المركز القومى للترجمة

ستيفن جابسر

الكتاب الموجز لنظرية الوَتَر

ترجمة:
إيمان طه أبو الدهب

2799

تدعي نظرية الوتر أن المكونات الأساسية التي تكون كل المادة ليست جسيمات ولكن أوتار، وتُشبه الأوتار قطعة دقيقة من المطاط ولكن رفيعة وقوية جدًا، ويُفترض أن يكون الإلكترون حقيقة وترًا يتذبذب ويدور بمقياس صغير للغاية يمنعنا من سبر كينونته حتى بأحدث مسرعات الجسيمات تطورًا حتى وقتنا هذا، ويُعتبر الإلكترون في بعض نماذج نظرية الوتر كوتر مغلق وفي البعض الآخر كوتر مفتوح بنهايتين.

سوف يوضح هذا الكتاب الأفكار الأساسية لنظرية الوتر الحديثة بما يشمل النقاش حول التطبيقات الحالية لفيزياء المصادمات، وتقوم نظرية الوتر على دعامتين أساسيتين: ميكانيكا الكم ونظرية النسبية، وتشمل المواضيعات التي سيتم مناقشتها في هذا الكتاب جانبًا من نظرية الأوتار بما يتجنب الجانب الرياضي منها.

تصميم الغلاف : جاسر

الكتاب الموجز لنظرية الوتر

المركز القومى للترجمة
تأسس فى أكتوبر ٢٠٠٦ تحت إشراف: جابر عصفور
مدير المركز: أنور مغيث

- العدد: 2799
- الكتاب الموجز لنظرية الوتر
- ستيفن جابسر
- إيمان طه أبو الدهب
- اللغة: الإنجليزية
- الطبعة الأولى 2016

هذه ترجمة كتاب:
The Little Book of String Theory
By: Steven S. Gubser

Published by Princeton University Press, 41 William Street, Princeton, New Jersey 08540
In the United Kingdom: Princeton University Press, 6 Oxford Street, Woodstock, Oxfordshire OX20 1TW

شارع الجبلاية بالأوبرا– الجزيرة– القاهرة. ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤
El Gabalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo.
E-mail: nctegypt@nctegypt.org Tel: 27354524 Fax: 27354554

الكتاب الموجز لنظرية الوتر

تــأليف: ســتيفن جابــسر
ترجمـــة: إيمان طه أبو الدهب



2016

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشئون الفنية

جابسر، ستيفن
الكتاب الموجز لنظرية الوتر/ تأليف: ستيفن جابسر، ترجمة: إيمان طه أبو الدهب
ط ١ – القاهرة: المركز القومي للترجمة، ٢٠١٦
١٦٨ ص، ٢٤ سم
١ – الفيزياء – نظريات
(أ) أبو الدهب، إيمان طه (مترجم)
(ب) العنوان ٥٣٠,١

رقم الإيداع: ١١٩٠٢/ ٢٠١٥
الترقيم الدولي: I.S.B.N - 978 - 977 - 92 - 0330 - 0
طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

المحتويات

المقدمة

تُعتبر نظرية الوتر نظرية غامضة. ويُفترض أنها نظرية كل شيء، لكن لم يتم التحقق منها عمليًا. وتُعتبر نظرية سرية مقصورة على علمائها، وهى تتعلق بالأبعاد الإضافية والتراوحات الكمية والثقوب السوداء. هل يمكن أن يكون هذا هو عالمنا؟ ولماذا لا يكون كل شيء أبسط من هذا؟

نظرية الوتر نظرية غامضة، المشاركون فيها (وأنا منهم) يقبلون عدم الفهم الكامل لهذه النظرية. ولكن الحسابات وراء الحسابات تُنتج دائمًا نتائج جميلة، ومتسقة على عكس المتوقع. ويشعر المرء بإحساس خاص يتعذر اجتنابه من دراسة نظرية الوتر، وكيف لا يمكن أن يكون هذا هو عالمنا؟ وكيف يمكن أن تفشل هذه الحقائق العميقة فى الاتصال بعالم الحقيقة؟

نظرية الوتر نظرية غامضة. وهى تشد كثيرًا من الخريجين ذوى الذكاء نحوها بعيدًا عن أى موضوعات رائعة أخرى، مثل الموصلية الفائقة التى لها بالفعل تطبيقات صناعية. وهى تجذب انتباه الإعلام مثل مجالات أخرى فى العلوم، ولها عدد من العلماء الذين يحطون من قدرها، ويتأسفون حزنًا على انتشار تأثيرها، ويقومون بصرف النظر عن إنجازاتها لعدم ارتباطها بالعالم التجريبى.

اختصارًا، يُعتبر ادعاء نظرية الوتر أن المكونات الأساسية التى تكون كل المادة ليست جسيمات، ولكنها أوتار. وتُشبه الأوتار قطعة دقيقة من المطاط ، لكنها رفيعة جدًا وقوية جدًا. ويُفترض أن يكون الإلكترون حقيقةً وترًا، يتذبذب ويدور بمقياس صغير للغاية يمنعنا من سبر كينونته حتى بأحدث مسرعات الجسيمات

تطورًا حتى وقتنا هذا. ويُعتبر الإلكترون فى بعض نماذج نظرية الوتر وترًا مغلقًا، وفى البعض الآخر وترًا مفتوحًا بنهايتين.

وسنأخذ الآن دورة مختصرة للتطور التاريخى لنظرية الوتر.

أحيانًا تُعتبر نظرية الوتر نظرية اخترعت عكسيًا. ومعنى اخترعت عكسيًا أنه كان لدى بعض العلماء أجزاء من هذه النظرية تعمل بصورة سليمة دون فهم المعنى العميق لهذه النتائج. ولأول مرة، فى عام ١٩٦٨، استطعنا الحصول على صيغة جميلة لوصف كيف يمكن لهذه الأوتار أن ترتد حول بعضها البعض. وقد تم عرض هذه الصيغة دون أن يُدرك أحد أن الأوتار ليس لها أى علاقة بها. وتُعتبر الرياضيات شيئًا طريفًا بهذه الطريقة. فيمكن أحيانًا للصيغة الرياضية أن تُستخدم، أو تُراجع، وتُطور دون فهم عميق لها. والفهم العميق فى حالتنا يشمل احتواء نظرية الوتر على الجاذبية كما توصف بالنظرية النسبية العامة.

وفى السبعينيات وأوائل الثمانينيات، تأرجحت نظرية الوتر على حافة النسيان. ولم يبد أنها تفى بالغرض الأساسى لها، ألا وهو وصف القوى النووية. وبالرغم من استخدامها ميكانيكا الكم، كان يبدو ظهور عدم توافق فى النظرية يُسمى بالشذوذات؛ وكمثال لمثل هذه الشذوذات ففى حالة وجود جسيمات شبيهة بجسيمات النيوترينو، ولكن مشحونة بشحنة كهربية، ففى هذه الحالة يمكن لبعض أنواع مجالات الجاذبية أن تخلق شحنة كهربائية تلقائيًا. وهذا شىء ضار حيث إن ميكانيكا الكم تحتاج إلى أن يحافظ الكون على توازن دقيق بين الشحنات السالبة، مثل الإلكترونات، والشحنات الموجبة، مثل البروتونات. وبالتالى، ففى عام ١٩٨٤، كان هناك نجاح كبير حينما تم إثبات أن نظرية الوتر خالية من الشذوذات. وبالتالى بدأ التصور أن هذه النظرية تمثل مرشحًا جيدًا لوصف الكون.

وكانت تلك النتائج بداية لما يسمى ثورة الوتر الفائق الأولى التى تتميز بنشاط محموم وتقدم ظاهر، بالرغم من بعدها عن تحقيق الهدف الأساسى لها، وهو

إنتاج نظرية كل شيء. وفي هذه الأوقات كنت طفلاً بجوار مركز أسبن للفيزياء ذي النشاط الفائق وأنا أتذكر ما كان يتحدث به البعض. هل يتم اختبار نظرية الوتر الفائق في المصادم الفائق ذي الموصلية الفائقة؟. وكنت أتساءل ما معنى كل هذا الفائق؟ حسنًا فإن الأوتار الفائقة هي عبارة عن أوتار ذات خاصية التماثل الفائق، ولكن ما معنى التماثل الفائق هذا؟ سأحاول أن أخبركم بوضوح أكثر في الكتاب فيما بعد، لكن دعونا الآن نوضح حقيقتين جزئيتين حول هذا الموضوع. الأولى: يربط التماثل الفائق بين جسيمات ذات لف مختلف. ولف الجسيم يشبه لف اللعبة المسماة بالنحلة، لكن على عكس النحلة فإن الجسيم لا يمكن أن يتوقف عن اللف. الثانية: نظريات الوتر ذات التماثل الفائق تُعتبر أفضل نظريات الوتر من حيث فهمنا لها. وبرغم أن نظريات الوتر دون التماثل الفائق تتطلب ٢٦ بعدًا فإن نظريات الوتر ذات التماثل الفائق تتطلب فقط عشرة أبعاد. لكن يجب أن يقبل المرء أنه حتى في حالة عشرة أبعاد فإنه يوجد ستة أبعاد إضافية؛ حيث إننا ندرك فقط ثلاثة أبعاد مكانية وبعدًا واحدًا زمانيًا. ولجعل نظرية الوتر نظرية لوصف العالم الحقيقي فإنه يجب بطريقة أو أخرى التخلص من هذه الأبعاد الإضافية أو إيجاد دور مفيد لها.

وفي باقي الثمانينيات كان نظريو الوتر يحاولون بشدة اكتشاف نظرية كل شيء، لكن لم يكن هناك فهم كافٍ لنظرية الوتر ثم اتضح أن الأوتار ليست كل القصة. تطلبت النظرية أيضًا وجود ما يسمى بالأغشية، وهي أشياء تمتد في أبعاد متعددة. وأبسط نوع من هذه الأغشية هو الغشاء الموجود بالطبلة، وهو غشاء في بعدين مكانيين، وهو عبارة عن سطح يمكن له التذبذب. وتوجد أيضًا أغشية ثلاثية وهي تملأ الأبعاد الثلاثة للفراغ التي نشعر بها ويمكن لها التذبذب في الأبعاد الإضافية كما تتطلب نظرية الوتر. ويمكن أيضًا أن توجد أغشية رُباعية وخُماسية

الأبعاد حتى تُساعية الأبعاد. وربما يبدو هذا أكثر مما نستطيع استيعابه لكن توجد أسباب قوية تجعلنا نؤمن بأنه لا معنى لنظرية الوتر دون احتوائها على هذه الأغشية. وبعض هذه الأسباب مرتبط بثنائيات الوتر، وتعنى الثنائية وجود علاقة بين أشياء تبدو مختلفة. وتمثل رقعة الشطرنج مثالاً بسيطًا لهذه الثنائية التى يمكن اعتبارها رقعة بيضاء ذات مربعات سوداء والرؤية الأخرى أنها رقعة سوداء بمربعات بيضاء. وكلا الوصفين يمداننا بوصف كامل لما تبدو عليه رقعة الشطرنج، وهما رؤيتان مختلفتان ولكنهما مرتبطتان ببعضهما من خلال تبديل الأبيض بالأسود.

وظهرت ثورة الوتر الفائق الثانية فى منتصف التسعينيات معتمدةً على الفهم الواضح لثنائيات الوتر ودور الأغشية. وللمرة الثانية تم بذل الجهود لاستثمار هذا الفهم الجديد لوضع مخطط نظرى يؤهله كنظرية كل شيء. وتعنى كل شيء هنا كل اتجاهات الفيزياء الأساسية التى نفهمها، والتى تم اختبارها كثيرًا. وتُعتبر الجاذبية جزءًا من الفيزياء الأساسية، وكذلك النظرية الكهرومغناطيسية والقوى النووية أيضًا الجسيمات الدقيقة مثل الإلكترونات، البروتونات والنيوترونات، والتى تُصنع منها كل الذرات. وبالرغم من أن تركيب نظرية الوتر يمكن أن يُنتج فهمًا واسعًا لكل ما نعرف فإنه توجد مشاكل دائمًا للوصول إلى نظرية حية. وفى الوقت نفسه كلما زاد علمنا بنظرية الأوتار أدركنا أننا لا نعرف عنها شيئًا. ولهذا يبدو أننا نحتاج إلى ثورة ثالثة لنظرية الوتر الفائق لكن لم يتم هذا بعد، وبالعكس ما يتم الآن هو محاولة نظريىّ الوتر استخدام فهمهم عن النظرية للحصول على تفسير لبعض التجارب سواء الحالية أو وشيكة الوقوع. وأقوى هذه الأنشطة يظهر فى محاولة ربط نظرية الوتر بالتصادمات ذات الطاقة العالية للبروتونات أو الأيونات الثقيلة. وهذه الارتباطات التى نأمل فى وجودها ربما تعتمد على أفكار التماثلية الفائقة أو الأبعاد الإضافية أو آفاق الثقوب السوداء أو ربما هذه الأفكار الثلاث معًا.

دعنا نتحدث الآن عن نوعى التصادمات اللذين تمت الإشارة إليهما.

تصادمات البروتون سوف يتم التركيز عليها فى تجارب فيزياء الطاقة العالية ويعود الفضل فى ذلك إلى المصادم الهادر ونى الكبير القريب من جنيف LHC. سيقوم LHC بتسريع البروتونات فى حزم تدور عكسيًا ثم يتم سحقها معًا فى تصادم عنيف عندما تصل سرعتها قريبةً من سرعة الضوء. ويعتبر هذا النوع من التصادمات عشوائيًا ولا يمكن التحكم به. وما يبحث عنه التجريبيون هو بعض الأحداث النادرة حيث يُنتج التصادم جُسيمًا غير ثابت ذا كتلة ضخمة، هذا الجسيم (الذى لا يزال وجوده افتراضيًا) يُدعى بوزن هيجز ويُعتقد أنه المسئول عن إعطاء الإلكترون كتلته. وتتنبأ نظرية التماثل الفائق بجسيمات أُخرى كثيرة وفى حالة اكتشافها سيكون هذا دليلاً واضحًا على أن نظرية الوتر على الطريق السليم. وتوجد أيضًا إمكانية ضعيفة لإنتاج ثقوب سوداء صغيرة خلال اصطدام البروتونات التى تمكن ملاحظة تحللها.

وفى تصادمات الأيونات الثقيلة يتم تجريد ذرة ذهب أو رصاص من جميع الإلكترونات الموجودة بها ويتم تسريعها فى الماكينة نفسها التى يتم بها تصادم البروتونات. ويعتبر تصادم الأيونات الثقيلة أكثر عشوائيًا من تصادم البروتونات. ويُعتقد أنه فى هذه الحالة سيتم تحلل البروتونات والنيوترونات لمكوناتها الأساسية من الكواركات والجلونات. وستكوّن الكواركات والجلونات مائعًا يتمدد ويبرد. وفى النهاية سيتجمد مرة أُخرى إلى جسيمات تمكن ملاحظتها بالمكتشفات. ويُسمى هذا السائل بلازما الكوارك – جلون. ويعتمد ارتباط هذا التصادم بنظرية الوتر على المقارنة بين بلازما الكوارك – جلون والثقوب السوداء. ومن الغريب أن هذا النوع من الثقوب السوداء المناظر لبلازما الكوارك – جلون لا يقع فى عالم الأبعاد الأربعة التى نحيا فيها، ولكن فى مكان منحنى ذى خمسة أبعاد.

ويجب تأكيد أن ارتباط نظرية الوتر بالعالم الحقيقى هو ارتباط تخمينى فالتماثل الفائق يمكن ببساطة ألا يكون موجودًا. وبلازما الكوارك – جلون المنتجة

من LHC من الممكن ألا تتصرف كثيرًا مثل الثقب الأسود ذى الأبعاد الخمسة. والشيء المثير هو أن نظريىّ الوتر مع باقى النظريين فى المجالات الأخرى يضعون رهاناتهم على نتائج نظرية الوتر، ويمسكون أنفاسهم انتظارا لنتائج الاكتشافات التجريبية التى يمكن أن تُثبت أو تحطم آمالهم.

وسوف يوضّح هذا الكتاب الأفكار الأساسية لنظرية الوتر الحديثة بما يشمل النقاش حول التطبيقات الحالية لفيزياء المصادمات. وتقوم نظرية الوتر على دعامتين أساسيتين: ميكانيكا الكم ونظرية النسبية. والموضوعات التى ستتم مناقشتها فى هذا الكتاب تشمل جانبًا من نظرية الأوتار بما يتجنب الجانب الرياضى منها. ويعكس اختيار الموضوعات في هذا الكتاب اهتماماتى، وربما حدود فهمى لهذا الموضوع.

والاختيار الآخر فى هذا الكتاب هو مناقشة الموضوعات الفيزيائية وليس الفيزيائيين أنفسهم، بما يعنى أننى سأبذل جهدى لتعريفكم بنظرية الوتر. ولست أنوى التحدث عن العلماء الذين قاموا بكل هذا (لا أعتبر نفسى من مؤسسى هذه النظرية). ولتوضيح الصعوبات الموجودة لربط الأفكار بالبشر دعنا نبدأ السؤال عمن وضع النسبية، قد كان ألبرت أينشتين فهل هذا صحيح؟ نعم ولكن إذا وقفنا عند اسم واحد فقط فسنفقد الكثير فقد قام كل من لور نتز وهنرى بوانكاريه باعمال مهمة قبل ظهور أينشتين. بينما قام منكوفسكى بوضع إطار رياضى مهم لهذه النظرية. وقام ديفيد هيلبرت منفردًا بوضع أساس مهم للنسبية العامة. وتوجد أيضًا أسماء كثيرة مهمة قبل ظهور أينشتين مثل جيمس كليرك ماكسويل، جورج فيتزجرالد وجوزيف لارمور الذين يستحقون الإشارة إليهم بالإضافة إلى الرواد الجدد مثل جون ويلر وشاندرا سيكار. ويعتبر تطور ميكانيكا الكم أكثر تعقيدًا حيث لا يوجد اسم واحد مثل أينشتين الذى تُعتبر إضافته أعلى من الآخرين. وبالعكس توجد مجموعة شهيرة من العلماء، والتى تشمل ماكس بلانك، أينشتين، رذرفورد،

نيلز بور، لوى دى برولى، هيزنبرج، شرودنجر، ديراك، باولى، باسكال جوردان وجون فون نيومان والتى قامت بأعمال مهمة والتى أحيانًا تتنافى مع بعضها البعض. ولسوف يكون مشروعًا أكثر طموحًا لإعطاء رصيد للكثير من أصحاب الأفكار فى نظرية الوتر. وإحساسى أن مثل تلك المحاولة تناقض هدفى الأساسى وهو نقل الأفكار ذاتها إلى القراء.

والغرض من الفصول الثلاثة الأولى من هذا الكتاب هو التعريف بالأفكار الأساسية المهمة لفهم نظرية الوتر ولكنها لا تُعتبر جزءًا منها. وهذه الأفكار هى الطاقة، ميكانيكا الكم والنسبية العامة وتُعتبر أكثر أهمية (حتى الآن) من نظرية الوتر ذاتها؛ لأننا نعلم أنها تصف عالمنا الحقيقى. ويعتبر الفصل الرابع، حيث أقوم بتقديم نظرية الوتر، خطوة نحو المجهول. بينما أحاول فى الفصول ٤،٥،٦ أن أجعل نظرية الوتر، أغشية *D*، وثنائيات الوتر تبدو كأشياء معقولة بقدر ما أستطيع لكن تظل الحقيقة أنه لم يتم التحقق من أن هذه الأفكار تصف العالم الحقيقى. ويُمثل الفصلان ٧، ٨ محاولة حديثة لربط نظرية الوتر بالتجارب التى تشمل تصادم جسيمات الطاقة العالية. ويُعتبر التماثل الفائق، وثنائيات الوتر، والثقوب السوداء فى البعد الخامس محاولات نظريىّ الأوتار لفهم ما يحدث وما سوف يحدث فى مسرعات الجسيمات.

وقد قُمت باقتباس قيم عددية لبعض الكميات الفيزيائية فى كثير من الأماكن داخل هذا الكتاب مثل الطاقة الناتجة عن الانتشار النووى والتأخير الزمنى للمتسابق الأوليمبى. والغرض من هذا هو تأكيد أن علم الفيزياء هو علم كمى حيث القيم العددية للأشياء لها أهمية. ومع هذا فبالنسبة للفيزيائى فما يُثير اهتمامه عادةً هو القيمة التقريبية للكمية الفيزيائية. فمثلاً فإن التأخير الزمنى للعداء الأوليمبى نحو جزء من ١٠^١٥ بالرغم من أن التوقع الأكثر دقة، بافتراض أن سرعته نحو ١٠م/ث، هو جزء من ٨ .١ × ١٠ ^١٥. وبالنسبة للقراء الذين يرغبون فى معرفة حسابات أكثر دقة من المذكورة فى هذا الكتاب يمكن لهم زيارة الموقع الإلكترونى:

http//press.princeton.edu/titles/9113.html ،

إلى أين تذهب نظرية الوتر؟ تعد نظرية الوتر بتوحيد الجاذبية مع ميكانيكا الكـم، وتعد أيضًا بتقديم نظرية واحدة تصف كل قوى الطبيعة. وتعد أيضًا :فهم جديد للزمـان، والمكان، والأبعاد الإضافية التى لم تُكتشف بعد. وتعد أيضًا بربط أفكار تبدو بعيدة عـن بعضها مثل الثقوب السوداء وبلازما الكوارك – جلون. حقًا إنها نظرية واعدة.

كيف يمكن لنظريىّ الوتر تحقيق هذه الوعود فى مجالهم؟ الحقيقـة أنـه تـم تحقيق معظم هذه الوعود. ولقد قدمت بالفعل نظرية الـوتر سلـسلة رائعـة مـن الاستنتاجات بدءًا من نظرية الكم وانتهاءً بالنسبية العامة، وسوف أقوم بوصف هـذه الاستنتاجات فى الفصل الرابع. وتقدم نظرية الأوتار بالفعل صورة مؤقتة للطريقـة التى يمكن أن نصف بها كل قوى الطبيعة. وسوف أقوم فى الفصل السابع بإيـضاح هذه الصورة وسوف أُخبرك ببعض الصعوبات لجعل هذه الـصورة أكثـر دقـةً. وكذلك سوف أقوم بشرح كيف أن حسابات نظرية الوتر قد تمت مقارنتهـا بالفعـل بالبيانات الناتجة من تصادمات الأيونات الثقيلة وذلك فى الفصل الثامن.

ولستُ أهدف إلى وضع تساؤلاتى الخاصة عن نظرية الوتر فى هذا الكتاب، لكن سأركزُ على الكثير من عدم الاتفاق الشائع حول هذه النظريـة. فـإذا جـاءت نتيجة ملحوظة من نظرية الوتر فإن مؤيد هذه النظرية سوف يقـول "هـذا شـىء رائع، لكن من الممكن أن يكون أفضل لو فعلنا كذا وكذا"، وفى الوقت نفـسه، فـإن الناقد يمكنه القول "هذا شىء محزن ولو فعلوا كذا وكذا ربما كنتُ أكثـر انبهـارًا" وفى النهاية فإن المؤيد والناقد (على الأقل الأكثر جدية والأكثر معرفـةً فـى كـل معسكر) ليسا بعيدين عن بعضهما كثيرًا بالنسبة لهذا الموضوع. فالكل يتفـق علـى وجود أسرار عميقة فى الفيزياء الأساسية. ويتفق الجميع تقريبًا علـى أن نظريـىّ الوتر يقومون بمحاولات جادة لكشف هذه الأسرار. وبالتأكيد يمكن الاتفاق علـى أن كثيرًا من وعود نظرية الأوتار لم يتم تحقيقها بعد.

الفصل الأول

الطـاقـــة

هدفنا فى هذا الفصل هو إبراز أشهر معادلـــة فـــى الفيزيـــاء: $E = mc^2$. فتشمل هذه المعادلة القدرة النووية والقنابل الذرية وهى تدل ببساطة على أنـــه لـــو قمت بتحويل رطل واحد من المادة كليةً إلى طاقة تستطيع بهـــذه الطاقـــة إضـــاءة مليون منزل أمريكى لمدة عام. ولهذه المعادلة علاقة قوية بنظرية الـــوتر وســـنقوم بمناقشة هذه العلاقة على الخصوص فى الفصل الرابع حيث يمكن تحديد كتلة الوتر المهتز اعتمادًا على طاقته التذبذبية.

والغريب فى هذه المعادلة $E = mc^2$ أنها تقوم بربط أشـــياء لـــيس لهـــا ارتباط ظاهرى، E هى الطاقة مثل الكيلو وات/ ساعة التى يتم دفعها فى كل شـــهر إلى شركة الكهرباء، m هى الكتلة مثل كيلو جرام من الـــدقيق، C هـــى ســـرعة الضوء التى تساوى تقريبًا ٢٩٩,٧٩٢,٤٥٨متـــرًا فـــى الثانيـــة وتـــساوى تقريبـًــا ١٨٦,٢٨٢ ميلاً فى الثانية. فواجبنا الأساسى الآن هو إيضاح ما يدعوه الفيزيـــائيون (كميات ذات أبعاد) مثل الطول، الكتلة، الزمن والسرعة ثم نعـــود إلـــى المعادلـــة $E = mc^2$. وخلال هذه الفترة سوف أقوم بتقديم الوحدات المترية مثل الأمتار، الكيلوجرامات، الرموز العلمية لبعض الأعداد الكبيرة، وقليل من الفيزياء النوويـــة. وبالرغم من أنه ليس من الضرورى فهم الفيزياء النووية لأستيعاب نظريـــة الـــوتر لكنها مجال مناسب لمناقشة المعادلة $E = mc^2$. وفى الفصل الثـــامن ســـأعود مرة أخرى لشرح بعض الجهد المبذول فى استخدام نظرية الوتر لفهمٍ جيدٍ لـــبعض نقاط الفيزياء النووية الحديثة.

الطول، والكتلة، والزمن، والسرعة

يُعتبر الطول أسهل الكميات ذات الأبعاد ويمثل ما نقــوم بقياســه بواســطة مسطرة. ويُصر الفيزيائيون بوجه عام على استخدام النظام المترى وهو ما ســأقوم بفعله الآن. والمتر تقريبًا يساوى ٣٩,٣٧ بوصة بينما الكيلو متر هــو ١٠٠٠ متــر ويساوى تقريبًا ٠,٦٢١٤ ميل.

يُعتبر الزمن بعدًا إضافيًا عند الفيزيائيين، ولهذا فإن الأبعاد الأربعة الكليــة ثلاثة منها تمثل الفراغ وواحد للزمن. ولكن الزمن يختلف عن الفراغ حيــث إنــه يمكنك التحرك فى أى اتجاه خلال الفراغ ولكنك لا تستطيع العودة للخلــف خــلال الزمن. وفى الحقيقة فإنك لا تستطيع التحرك فى الزمن على الإطلاق فإن الثــوانى تدق بصرف النظر عما تفعله أنت. على الأقل هذه هى الخبرة اليومية فــى حياتنــا ولكن الأمر فى الحقيقة ليس بهذه البساطة. فعلى سبيل المثال إذا كنت تــدور فــى دائرة سريعًا جدًا ولك زميل يقف ساكنًا فإن الزمن الذى تشعر به يمر بسرعة أقــل. ولو ارتديت أنت وصديقك ساعتى إيقاف فإن ساعتك سوف تُظهر مرور زمن أقــل من ساعة صديقك. هذه الحقيقة المسماة بتمدد الزمن تكون ضئيلة جدًا إلا إذا كانــت سرعتك التى تجرى بها مقاربة لسرعة الضوء.

وتقيس الكتلة كمية من المادة ولقد اعتدنا التفكير فى الكتلــة مثــل الــوزن ولكنها ليست كذلك. فالوزن يرتبط بالشد التجاذبى، فإذا كنــت موجــودًا بالفــضاء الخارجى فإنك تصبح بلا وزن بالرغم من عدم تغير كتلتك. ومعظم كتــل الأشــياء اليومية تتمثل فى البروتونات والنيوترونات وجزء يسير منهــا فــى الإلكترونــات. وترمز كتلة الأشياء اليومية إلى الكمية المحتواة من النيوكلونات بهــا. والنيوكلــون

إما نيوترون أو بروتون. وكتلتى تقريبًا ٧٥ كيلو جرامًا وهى تمثل ٥٠٠٠٠ مليون مليون مليون مليون من النيوكلونات. ومن الصعوبة كتابة مثل هذه الأعداد الكبيرة لأنه يوجد بها عدد كبير من الأرقام التى يصعب عدها وبالتالى فإنه يمكن الاستغناء عن كتابة كل هذه الأرقام. وتمكن كتابة الرقم السابق على هذه الصورة ٥×١٠^{٢٨} ويمثل ٢٨ عدد الأصفار التى على يمين ٥ . وبالطريقة نفسها فإن المليون يمكن كتابته على الصورة ١×١٠^{٦} أو فقط $١٠^{٦}$.

دعنا نعود إلى الكميات ذات الأبعاد فى الفيزياء. تُمثل السرعة عامل تحويل ما بين الطول والزمن. بفرض أنك تستطيع أن تجرى ١٠ أمتار فى الثانية الواحدة (تُعتبر سريعة بالنسبة للإنسان) وبالتالى ففى ١٠ ثوانٍ تقطع مسافة ١٠٠ متر. وبافتراض أنك تجرى بهذه السرعة لمدة كيلو متر واحد فما الزمن الذى تحتاجه لقطع هذه المسافة؟ ستجد أنها ١٠٠ ثانية. ولقطع مسافة ميل واحد بهذه السرعة نفسها تحتاج إلى ١٦١ ثانية أو ما يعادل دقيقتين و٤١ ثانية. وبالطبع لا أحد يمكنه القيام بذلك لأنه مستحيل الجرى بهذه السرعة لمثل تلك المسافة.

وبفرض أنك فعلت هل يمكنك الشعور بتأثير تمدد الزمن الذى أشرتُ إليه سابقًا؟ بالطبع لا، سيكون معدل مرور الزمن أبطأ بمقدار واحد لكل $١٠^{١٥}$. وللحصول على تأثير أقوى يجب أن تتحرك أسرع كثيرًا من هذا. ولهذا فإن الجسيمات التى تدور فى معجلات الجسيمات الحديثة تشعر بتمدد ضخم للزمن والزمن بالنسبة لها يمر أبطأ ١٠٠٠ مرة من بروتون فى حالة سكون.

وتُعتبر سرعة الضوء معامل تحويل بشع لاستخداماتنا اليومية بسبب ضخامتها. فيمكن للضوء أن يلف خط الاستواء للأرض فى نحو ٠,١ من الثانية مما يؤدى إلى أن الفرد الأمريكى يمكن أن يُجرى مكالمة تليفونية مع شخص آخر فى الهند ولا يلاحظ أى تأخير زمنى. وتُعتبر سرعة الضوء مفيدة عند التفكير فى المسافات الكبيرة جدًا فمثلاً المسافة إلى القمر تكافئ ١,٣ ثانية ضوئية وبالتالى

يمكن القول إن القمر يقع على بعد ١,٣ ثانية ضوئية بعيدًا عنا وبالمثل فإن الـــشمس تقع على بعد ٥٠٠ ثانية ضوئية.

وتُعتبر السنة الضوئية مسافة أكبر وهى تُمثل المسافة التى يقطعها الضوء فى السنة. ويُعتبر عرض مجرة الطريق اللبنى نحو ١٠٠٠٠٠ سنة ضوئية بينما عرض الكون المعلوم نحو ١٤ بليون سنة ضوئية وهو ما يعادل تقريبًا ١,٣ x ١٠ ^٢٦^م.

$$E = mc^2$$

تُمثل الصيغة الرياضية للطاقة وهى تشبه التحويل ما بين الزمن والمـــسافة كما ناقشنا سابقًا لكن ما الطاقة بالضبط؟ هذا سؤال صعب الإجابـــة عنـــه لوجـــود أشكال متعددة من الطاقة. فالحركة تُمثل طاقة، والكهرباء تُمثل طاقـــة، والحـــرارة تُمثل طاقة، والضوء يُعتبر طاقة. ويمكن تحويل كل صورة مـــن صـــور الطاقـــة السالفة إلى أُخرى فمثلاً المصباح الكهربائى يحول الكهرباء إلى حـــرارة وضـــوء بينما يحول المولد الكهربائى الحركة إلى كهرباء. ومن مبادئ الفيزيـــاء الأساســـية ثبوت الطاقة الكلية حتى إذا حدث تغير من صورة إلى أخرى. ولجعل هـــذا المبـــدأ مفهومًا يجب أن نقيس بدقة الصور المختلفة للطاقة التى يمكن أن تتحول من إحداها للأخرى.

تُعتبر طاقة الحركة نقطة جيدة للبدء فى هذا الموضوع. والصيغة الرياضية هى $k = \frac{1}{2}mv^2$ ، حيث k هى طاقة الحركة، m هى الكتلة وv هى الـــسرعة. تخيل نفسك عدَّاءً أوليمبيًّا فعن طريق بذل جهد بدنى عنيف يمكـــن أن تـــصل إلـــى السرعة $v = 10$ أمتار فى الثانية. ولكن هذا يُعتبر بطيئًا جـــدًا بالنـــسبة لـــسرعة

الضوء وبالتالى فإن طاقة الحركة تكون أصغر بكثير مـــن الطاقـــة $E = mc^2$ لكن ما معنى هذا؟

من المفيد أن نفهم أن الطاقة $E = mc^2$ تمثل طاقة السكون وهى الطاقـــة الموجودة بالمادة غير المتحركة. وعندما تجرى فإنك تقوم بتحويل جزء بسيط مـــن طاقة السكون إلى طاقة حركة والجزء البسيط هذا يمثل تقريبًا جـزءًا مـــن ١٠ ^١٥^ وليس من قبيل المصادفة أن يكون هذا الكسر أعنى جزءًا من ١٠ ^١٥^ يمثـل تمـدد الزمن عندما تجرى. وتقوم النسبية الخاصة باستنتاج علاقة دقيقة بين تمدد الـــزمن وطاقة الحركة. وتؤدى هذه العلاقة إلى استنتاج أنه إذا استطاع شـــىء مـــا زيـــادة سرعته لتصل كمية الحركة إلى الضعف عندها سيكون مرور الـــزمن أبطـــأ إلـــى النصف عن جسم ساكن.

ومما يدعو إلى الإحباط معرفتك أنك تحتوى كل طاقة السكون الضخمة هـــذه ولا تستفيد منها عند بذل أى مجهود إلا بهذا الكسر الضئيل الذى هو جزء مـــن ١٠ ^١٥^. لكن كيف يمكن أن نحصل على نسبة أكبر من طاقة السكون فى المادة أفضل إجابة لهذا السؤال هى الطاقة النووية.

ويعتمد فهمنا للطاقة النووية على هذه المعادلة $E = mc^2$ وهذا مختـــصر بسيط لما يحدث. تتكون الأنوية الذرية من بروتونات ونيوترونات. وتُعتبـــر نـــواة الهيدروجين أبسط الأنوية حيث تحتوى فقط على بروتون واحد، أما نـــواة الهيليـــوم فتشمل بروتونين ونيوترونين مرتبطين بشدة. ومعنى هذا أننا نحتاج كمية كبيرة من الطاقة لتفكيك نواة الهيليوم ولكن بعض الأنوية أســـهل فـــى التفكـــك.فمـــثلاً نـــواة اليورانيوم ٢٣٥ والمكونة من ٩٢ بروتونًا و١٤٣ نيوترونًا يمكن بسهولة تحطيمهـــا للحصول على أجزاء متعددة. فمـــثلاً إذا قمـــت بـــضرب نـــواة اليورانيـــوم ٢٣٥ بنيوترون يمكن انقسامها إلى نواة كريبتون ونواة باريوم وثلاثة نيوترونات وكميـــة

من الطاقة، وهذا يعتبر مثالاً للانــشطار النــووى. وتمكــن كتابــة هــذا التفاعــل بإيجاز كالآتى:



$$U + n \rightarrow Kr + Ba + 3n + Energy,$$

حيث يمثل U يورانيوم ٢٣٥، Kr يمثل الكربتون، Ba يمثل الباريوم و n النيوترونات (تجب الدقة عند كتابة يورانيوم ٢٣٥ حيث إنه توجد أنواع أخرى مــن اليورانيوم مثل يورانيوم ٢٣٨ وهو الأشهر ولكنه الأصعب فى التفكك).

وتسمح لنا المعادلة $E = mc^2$ بحساب كمية الطاقة الناتجة بدلالــة كتــل كل المواد الداخلة فى التفاعل الانشطارى. فقد اتضح أن المواد الداخلة فى التفاعــل (نواة يورانيوم ٢٣٥ والنيوترون) تزيد وزنا على المواد الناتجة (ذرة كريبتــون ، ذرة باريوم ، ثلاثة نيوترونات) بنحو خُمس كتلة البروتون. ولكــن هــذه الزيــادة الطفيفة فى الكتلة عند استخدامهــا فى المعادلة $E = mc^2$ تؤدى إلــى كميــة الطاقة الناتجة. وخُمس كتلة البروتون يمثل تقريبًا جزءًا من ألــف مــن كتلــة ذرة اليورانيوم ٢٣٥، وبالتالى فإن الطاقة الناتجة تُمثل جزءًا من ألف من طاقة الــسكون لذرة اليورانيوم ٢٣٥. ربما يبدو هذا ليس ضخمًا ولكنها تقريبًا أكبر تريليون مــرة من الطاقة التى يستخدمها العداء الأوليمبى على هيئة طاقة الحركة.

حتى الآن لم أشرح من أين تنتج الطاقة فى التفاعل الانشطارى. نُلاحــظ أن عدد النيوكلونات لم يتغير وهو ٢٣٦ قبل الانشطار وبعده، لكــن مــع هــذا فــإن مدخلات التفاعل ذات كتلة أكبر من النواتج. ويُعتبر هذا استثناءً مهمًا فــى القاعــدة التى تقول إن الكتلة تُمثل عدد النيوكلونات. والنقطــة أن النيوكلونــات فــى أنويــة الكريبتون والباريوم تكون مقيدة بإحكام أكثر من تلك الموجودة فى نواة اليورانيــوم ٢٣٥ المقيدة على نحو غير محكم. والتقييد المحكم يكافئ يعنى كتلة أقل، وبالتــالى فإن نواة اليورانيوم ٢٣٥ المقيدة على نحو غير محكم لها كتلة أكبر قلــيلاً والتــى

ستتحول إلى طاقة. وبإيجاز فإن التفاعل الانشطارى يطلق طاقة عندما يـتم وضـع البروتونات والنيوترونات فى وضع أكثر دمجًا.

ومن ضمن مشاريع الفيزياء النووية الحديثة معرفة ماذا سوف يحدث عنـدما تتفاعل الأنوية الثقيلة مثل اليورانيوم ٢٣٥ تفاعلاً أكثر عنفًا من التفاعل الانشطارى الذى تم وصفه. ويفضل التجريبيون العمل بذرات الـذهب بـدلاً مـن اليورانيـوم لأسباب لا أنتوى ذكرها. فعندما تُضرب نواتان من الذهب ضربًا سـاحقًا بـسرعة الضوء تقريبًا فسوف تتحطمان تمامًا بمعنى أن كل النيوكلونات سوف تتحطم. وفى الفصل الثامن سوف أخبركم عن حالة المادة الكثيفة الساخنة التى ستتكون فى مثـل هذا التفاعل.

تلخيصًا فإن المعادلة $E = mc^2$ تنص على أن كمية طاقة الـسكون فـى أى شىء تعتمد فقط على كتلته بسبب ثبات سرعة الضوء. ويمكن الحصول علـى جزء من هذه الطاقة بسهولة من اليورانيوم ٢٣٥ مقارنةً بأنواع أخرى من المـواد. لكن بوجه عام فطاقة السكون موجودة فى كل أنواع المواد بـصفة متماثلـة مثـل الصخور، الهواء، الماء، الأشجار، والبشر.

وقبل انتقالنا إلى ميكانيكـا الكـم دعنـا نتوقـف قلـيلاً لوضـع المعادلـة $E = mc^2$ فى مفهوم عقلانى أوسع. هذه المعادلة جزء من النـسبية الخاصـة التى تعنى بدراسة كيف أن الحركة تؤثر فى قياس كلٍ من الزمان والمكان. وتُعتبـر مصنفة ضمن النسبية العامة التى تشمل أيضًا الجاذبية والزمكان المنحنى. وتحتوى نظرية الوتر على كلٍ من النسبية العامة وميكانيكا الكم، وعلى الأخص فإن نظريـة الوتر تشمل العلاقة $E = mc^2$. وكل من الأوتار، الأغشية، والثقوب الـسوداء تخضع لهذه العلاقة. وكمثال فإننى سوف أناقش فى الفصل الخامس كيـف يمكـن لكتلة الغشاء أن تستقبل إسهامات من الطاقة الحرارية للغـشاء. ولـن يكـون مـن الصواب أن نقول إن $E = mc^2$ تنتج مباشرةً من نظرية الوتر ولكنها تتـواءم بشكل مذهل مع الأوجه الرياضية لنظرية الوتر.

الفصل الثانى

ميكانيكا الكم

بعد حصولى على درجة البكالوريوس فى الفيزياء قضيت عامًا بجامعة كامبريدج لدراسة الرياضيات والفيزياء. وتمتاز كامبريدج بمروجها الخضراء وسمائها الرمادية مع تاريخ عظيم لمنحها الدراسية الأرستقراطية. وكنت عضوًا بكلية سان جون التى يبلغ عمرها نحو خمسمائة عام. ولا أزال أتذكر بصفة خاصة عزفى على البيانو الموجود فى أحد الأدوار العليا فى مبنى كبير من أقدم مبانى الكلية. ومن ضمن القطع الموسيقية التى عزفتها قطعة لشوبان.

وقد جعلتنى أفكر فى ميكانيكا الكم. وسوف أقوم بتقديم بعض مفاهيم ميكانيكا الكم لتوضيح سبب تفكيرى هذا لكن لن أقوم بشرحها كاملةً. وبالعكس سأحاول أن أشرح كيف يمكن تجميع هذه المفاهيم فى تركيبة وهى تشبه تلك الموجودة فى قطعة شوبان. وفى ميكانيكا الكم كل الحركات ممكنة لكن يُفضل بعضها التى تُسمى حالات كمية ولها تردد محدد. والتردد يعنى عدد مرات التكرار فى الثانية. وفى قطعة شوبان الأجزاء التى تُلعب باليد اليمنى لها تردد أعلى بنسبة أربعة إلى ثلاثة من التى تُلعب باليد اليسرى. وفى الأنظمة الكمية فإن الشيء الذى يتكرر يكون أكثر تجريدًا: وهو عمليًا ما يُسمى بطور دالة الموجة. ويمكن تخيل طور دالة الموجة بالمشابهة مع عقرب الثوانى الذى يدور دورة كاملة كل دقيقة. ويقوم الطور بعمل الشيء نفسه أى أنه يتكرر لكن بتردد أعلى. وهذا الدوران السريع يُميز طاقة النظام بطريقة سأشرحها بالتفصيل فيما بعد.

والأنظمة الكمية البسيطة مثل ذرة الهيدروجين لها ترددات متناسبة فيما بينها بنسب بسيطة. وكمثال فطور حالة كمية يتكرر تسع مرات فى الوقت نفسه الذى يتكرر فيه طورٌ آخر أربع مرات. وهذا يشبه نسبة ثلاثة إلى أربعة التى تحدثنا عنها سابقًا فى حالة القطعة الموسيقية لشوبان. والترددات فى ميكانيكا الكم فى الغالب عالية جدًا. ففى ذرة الهيدروجين فإن الترددات الأساسية تقع فى المدى ١٠ ^١٥^ ذبذبة فى الثانية. وهذا أكثر بكثير من التردد فى قطعة شوبان حيث تلعب اليد اليمنى نحو ١٢ نغمة فى الثانية.

إن السحر الإيقاعى لمقطوعة شوبان ليس فقط لجمالها الأخاذ. يطفو اللحن فوق قاعدة كئيبة وتجرى النغمات معًا فى لطخة لونية. وتنتقل النغمات التوافقية متعارضة مع الانقضاء المتقطع للموضوع الرئيسى. ويعتبر التناغم البارع لنسبة اثنين إلى أربعة الستارة الخلفية لواحد من تأليف شوبان البارز.

وفى النظام الكمى عندما تكون الحالة الكمية عند ترددات محددة فإن المكونات الأساسية تتحول على المدى الكبير إلى عالمنا المعقد الملون. ولهذا فإن لهذه الترددات الكمية علاقة ثابتة بعالمنا: وكمثال فإن الضوء البرتقالى فى مصباح الشارع له تردد ثابت مرتبط بالحركة داخل ذرات الصوديوم. وتردد الضوء هذا هو ما يجعل لونه برتقاليًا.

وفى الجزء المتبقى من هذا الفصل سوف أقوم بالتركيز على ثلاثة موضوعات فى ميكانيكا الكم: مبدأ عدم اليقين، ذرة الهيدروجين، الفوتون. وسنتعرض من خلال هذا البحث إلى موضوع الطاقة بمظهر كمى أكثر ارتباطًا بالتردد. والتشابه مع الموسيقى أكثر ملاءمة بالنسبة إلى أوجه ميكانيكا الكم المرتبطة بالتردد. وفى القسم التالى سوف نلاحظ أن الفيزياء الكمية تعتمد على أفكار أساسية بعيدة عن أفكار خبراتنا اليومية.

عــدم اليقين

إن مبدأ عدم اليقين هو ركن أساسى فى علم ميكانيكا الكم. وهــو يــنص علــى استحالة قياس موضع وكمية حركة جسيم فى الوقت نفسه. عند قياس موضــع الجــسيم يُوجد عدم يقين يسمى بــ Δx. فمثلاً عند قياس طول قطعة مــن الخــشب يمكــن أن نحصل على الطول الصحيح بخطأ أقل من ١ \ ٣٢ من البوصة، إذا كُنت دقيقًا. بمعنى أن $x = 2$ m وهذا يعنى أنه يمكن أن يكون قياس قطعة الخشب $\Delta x \approx 1$ mm : مع دقة (أو عدم يقين) $\Delta x \approx 1$ mm (هذا طبعًا فى النظام الأوروبــى ولــيس فــى النظام الأمريكى حيث إن النظام الأمريكى يفضل القدم والبوصة).

وتُعتبر كمية الحركة شيئا مألوفًا من خبراتنا اليومية، ولكى نكون أكثر دقــة فى موضوع التصادم. فعند تصادم شيئين رأسًا برأس وتسبب الدفع فــى توقفهمــا كاملاً. فهذا يعنى أنه كان لديهما نفس كمية الحركة قبــل التــصادم. أمــا إذا ظــل أحدهما متحركًا فى الاتجاه نفسه لكن بالطبع أبطأ ففى هذه الحالة يكون لديه كميــة حركة أكبر مــن الــشيء الآخــر. وتوجــد صــيغة رياضــية لكميــة الحركــة $p: p = mv$ وبالطبع نستطيع قياس كمية الحركة ولكن القياس سوف يكون لــه عدم دقة (عدم يقين) وهذا سنرمز له بالرمز Δp.

وينص مبدأ عدم اليقين على أن $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$, حيث h تــسمى ثابت بلانك وπ = ٣,١٤١٥٩٠٠٠ وهى النسبة المــشهورة بــين محــيط الــدائرة وقطرها. وتمكن قراءة هذه الصيغة كالآتى (Δx مضروبة فى Δp لا تقل أبدًا عن ثابت بلانك مقسومًا على 4π). وهذا يعنى أنك يمكن أن تقيس موضــع وكميــة حركة الجسيم فى الوقت نفسه لكن حاصل ضرب عدم اليقين فــى كــلا القياســين لا يمكن أبدًا أن يقل عن ثابت بلانك مقسومًا على 4π.

ولفهم تطبيق مبدأ عدم اليقين تخيل جسيمًا محصورًا داخل شرك بعده يساوى Δx وبالتالى فإن موضع هذا الجسيم يكون معروفًا بدقة مع عدم اليقين Δx الضئيل. وينص مبدأ عدم اليقين على أنه من غير الممكن معرفة كمية حركة هذا الجسيم المحصور بدقة أكثر من قيمة معينة. وبالضبط فإن عدم اليقين فى كمية الحركة Δp يجب أن يكون كبيرًا لتحقيق المتباينة $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$. وتمثل الذرات مثالاً واضحًا لهذا كما سوف نلاحظ فى القسم التالى. ومن الصعوبة أن نجد مثالاً فى حياتنا اليومية لأن عدم الدقة Δx يكون صغيرًا جدًا عن الأشياء التى يمكن أن تمسكها فى قبضة يدك. وسبب هذا أن ثابت بلانك صغير جدًا وسوف نتعرض له مرةً أخرى عند دراسة الفوتونات، وسنعرف حينئذ قيمته العددية.

والطريقة فى الحديث عن مبدأ عدم اليقين ترتبط بمناقشة قياس كلٌ من الموضع وكمية الحركة. ولكن هذا المبدأ أعمق بكثير فهو يمثل تحديدًا جوهريًا لمعنى كل من الموضع وكمية الحركة. فهما عبارة عن أشياء أكثر تعقيدًا من مجرد كونهما أرقامًا بل تُسمى مؤثرات التى لا أنتوى أن أصفها إلا أن أقول إنها تركيبات رياضية دقيقة أكثر تعقيدًا من الأعداد. ويظهر مبدأ عدم اليقين بسبب الفرق بين الأعداد والمؤثرات. فالكمية Δx ليست فقط عدم اليقين فى القياس: ولكنها تمثل عدم اليقين الذى لا يمكن تبسيطه فى موضع الجسيم. ولهذا فإن مبدأ عدم اليقين لا يُمثل نقصًا فى المعرفة لكن يُمثل غموضًا أساسيًا فى العالم تحت الذرى.

الذرة

تتكون الذرة من إلكترونات تتحرك حول النواة الذرية وكما علمنا سابقًا فإن النواة تتكون من بروتونات ونيوترونات. وأبسط مثال نبدأ به هو ذرة الهيدروجين حيث تكون النواة مجرد بروتون واحد فقط ويوجد إلكترون واحد يدور حولها.

ويبلغ حجم الذرة تقريبًا 10^{-10} مترًا وهو ما يُدعى أنجستروم A (وهذا يعنى أن المتر الواحد يحتوى على ١٠ بلايين أنجستروم). وحجم النواة نحو مائة ألف مرة أصغر من حجم الذرة. وعندما نقول إن حجم الذرة نحو ١ أنجستروم فهذا يعنى أن الإلكترونات من النادر أن تبتعد عن النواة أكثر من هذا. وبالتالى فإن عدم يقين Δx فى موضع الإلكترون نحو ١ أنجستروم لأنه من لحظة لأخرى فإنه من المستحيل التنبؤ بموقع الإلكترون فى أحد جانبى النواة. وينص مبدأ عدم اليقين حينئذ على أنه يوجد عدم يقين Δp فى كمية حركة الإلكترون والمحققة للمتباينة $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$. وتفسير ذلك أن إلكترونًا فى ذرة الهيدروجين له سرعة متوسطة نحو ١ % من سرعة الضوء ولكن اتجاه حركة الإلكترون يتغير من لحظة لأخرى بطريقة لا يمكن التنبؤ بها. وعدم اليقين فى كمية حركة الإلكترون هى نفسها كمية الحركة بسبب عدم اليقين فى الاتجاه. والصورة الكاملة هى أن الإلكترون يكون محصورًا بسبب انجذابه إلى النواة . لكن ميكانيكا الكم تمنع الإلكترون من السكون فى هذا الشرك. لكن بدلاً من هذا فهو يهيم بشكل متواصل بالطريقة التى تحددها رياضيات ميكانيكا الكم. وهذا التجوال الدائم هو ما يُعطى الذرة حجمها. ولو كان مسموحًا للإلكترون بأن يظل ساكنًا فسوف يكون هذا داخل النواة لأنه منجذب إليها، وسوف تنهار المادة التى نعرفها ولهذا فإن التجوال الكمى للإلكترون داخل الذرات هو حقيقةً نعمة من الله.

وبالرغم من أن الإلكترون داخل ذرة الهيدروجين له وضع غير محدد وكمية حركة غير محددة فإن له طاقة محددة. والحقيقة فله عدة إمكانيات للطاقة. والطريقة التى يصف بها الفيزيائيون هذا الموقف أن يقولوا إن طاقة الإلكترون مكماة. وهذا يعنى أنه يجب عليه الاختيار ضمن مجموعة محددة من الإمكانيات. دعنا نعود إلى طاقة الحركة فى المثال السابق وقد علمنا أن لها صيغة رياضية $K = \frac{1}{2} mv^2$، دعنا نطبق هذه الصيغة على حركة سيارة. فبضخ كمية أكبر من الوقود يمكننا أن نحصل على أى سرعة كما نشاء. ولكن لو كانت طاقة السيارة

مكماة لما أمكننا أن نفعل هذا بمعنى أنك يمكن أن تتحرك بسرعة ١٠ أميال في الساعة أو ١٥ أو ٢٥ لكن لا يمكن أن تتحرك بسرعة ١١ أو ١٢ أو ١٢,٥ ميل في الساعة.

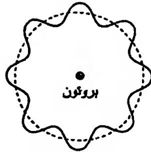
إن مستويات الطاقة المكماة للإلكترون في ذرة الهيدروجين تعود بي إلى التشابه مع الموسيقى. ولقد ذكرت أحد هذه التشابهات: وهي التردد في مقطوعة شوبان الموسيقية. فكل مستوى طاقة مكماة في ذرة الهيدروجين يناظر ترددًا مختلفًا. ويمكن للإلكترون أن يحتل أحد هذه المستويات وعندما يحدث هذا فكأنه حصل على إيقاع ثابت مثل البندول. لكن يمكن للإلكترون أيضًا أن يختار أن يكون جزئيًا في مستوى طاقة معين وجزئيًا في مستوى آخر، وهذا ما يسمى التراكب. وقطعة شوبان الموسيقية تُعتبر مركبة من ترددين مختلفين أحدهما باليد اليمنى والآخر باليسرى.

قد أخبرتك حتى الآن أن الإلكترون داخل الذرات له موضع وكمية حركة غير محددتين كميًا لكن له طاقة مكماة. أليس من الغريب أن تكون الطاقة ثابتة عند قيم محددة بينما الموضع وكمية الحركة لا يمكن أن يكونا ثابتين؟ لفهم كيف يمكن أن يحدث هذا دعنا نلتفت إلى تشابه آخر مع الموسيقى. دعنا نفكر في أوتار البيانو عندما تُضرب فإنها تتذبذب بتردد معين. كمثال فإن A فوق C الأوسط في البيانو يهتز ٤٤٠ مرة في الثانية. وغالبًا ما يعبِّر الفيزيائيون عن الترددات بدلالة الهرتز وهو عبارة عن ذبذبة واحدة في الثانية. وعلى ذلك فإن A فوق C الأوسط في البيانو له تردد ٤٤٠ هرتز، وهذا أسرع بكثير من تردد الموسيقى الموجود في قطعة شوبان الموسيقية وهو نحو ١٢ هرتز. ولكنها أبطأ جدًا جدًا من ترددات ذرة الهيدروجين. وفي الحقيقة فإن حركة الوتر في البيانو أكثر تعقيدًا من ذبذبة واحدة فتوجد نغمات توافقية عند الترددات العالية وهو ما يُعطي البيانو صوته المميز.

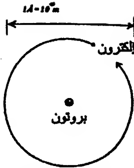
ربما يبدو هذا بعيدًا عن حركة الإلكترون المكماة فى ذرة الهيدروجين، ولكن فى الحقيقة هما متقاربتان. فإن أقل طاقة للإلكترون فى الهيدروجين تماثل التردد الرئيسى لوتر البيانو: ٤٤٠ هرتز للوتر A فوق C الأوسط ويكون تردد الإلكترون فى أقل مستويات الطاقة نحو ٣ × ١٠ ^١٥^ هرتز والطاقات الأخرى الممكنة للإلكترون تماثل النغمات التوافقية لوتر البيانو، وذلك بتبسيط كبير.

تُعتبر موجات أوتار البيانو والحركة المكماة للإلكترون داخل ذرة الهيدروجين كمثالين للموجات الساكنة. ومعناها تذبذب دون تحرك لأى مكان. فوتر البيانو ممسوك من الطرفين وبالتالى فإن التذبذبات مقيدة بطول الوتر. وحركة الإلكترون المكماة داخل ذرة الهيدروجين مقيدة لمكان أصغر جدًا. وهى أكبر قليلاً من أنجستروم واحد. والفكرة الأساسية خلف رياضيات ميكانيكا الكم هى معالجة حركة الإلكترون كموجة. وعندما يكون للموجة تردد محدد مثل التردد الأساسى لوتر البيانو فإن الإلكترون تكون له طاقة محددة. ولكن موضع الإلكترون لا يمكن أن يكون رقمًا محددًا لأن الموجة التى تصفه تكون موجودة فى كل مكان داخل الذرة لحظيًا. وهذا يماثل ذبذبة وتر البيانو فهى تتذبذب لكل الوتر لحظيًا. وكل ما يمكن أن نقوله إن الإلكترون يكون تقريبًا بعيدًا بمقدار أنجستروم (*A*) واحد عن النواة.

بعد أن تعلمنا أن الإلكترونات يمكن وصفها كموجات يمكنك أن تسأل ما الذى يتموج؟ إنه سؤال صعب. إحدى الإجابات أن هذا لا يهم. والإجابة الأخرى أنه يوجد مجال إلكترونى يخترق كل الزمكان وتُعتبر الإلكترونات صورًا مستثارة له. والمجال الإلكترونى يشبه وتر البيانو بينما يشبه الإلكترون ذبذبة وتر البيانو.



ذرة هيدروجين كمية



ذرة هيدروجين كلاسيكية

يسارًا: الصورة الكلاسيكية لذرة الهيدروجين حيث يلف إلكترون حول بروتون. يمينًا: الصورة الكمية بدلالة الموجات الساكنة. وبدلاً من تتبع مسار محدد فإن الإلكترون يمثل بموجة ساكنة، فليس له موضع محدد لكن له طاقة محددة.

ولا تكون الموجات دائمًا مقيدة بفراغات صغيرة مثل داخل الذرة. فكمثال فإن موجات البحر يمكن أن تسافر عدة أميال قبل انكسارها على الشاطئ. وهناك أمثلة للموجات المسافرة فى ميكانيكا الكم مثل الفوتونات. لكن قبل أن نتكلم عن الفوتونات هناك تقنيات ينبغى علىَّ أن أناقشها لأنها مرتبطة بأشياء سوف تظهر فى الفصول القادمة. لقد اقتبست كلمة تردد لحركة الإلكترون داخل ذرة الهيدروجين، وقد أشرت إلى أن هذا تبسيط شديد. ولشرح كيف أن هذا تبسيط شديد فلسوف أقدم صيغة رياضية جديدة: $E = h\nu$ حيث E هى الطاقة ، ν هو التردد، h هو ثابت بلانك نفسه الذى ظهر فى مبدأ عدم اليقين. وتُعتبر الصيغة $E = h\nu$ صيغة بديعة حيث إنها تخبرنا أن التردد ما هو إلا طاقة فى مظهر جديد. وهنا تظهر مشكلة: فتوجد أنواع كثيرة من الطاقة. فالإلكترون له طاقة سكون، وله أيضًا طاقة حركة. بالإضافة إلى طاقة الربط وهى كمية الطاقة التى نحتاجها لندفع الإلكترون بعيدًا عن البروتون. فأيهما يمكن أن يُستخدم فى هذه الصيغة $E = h\nu$ ؟

وعندما استخدمت الرقم ٣ × ١٠ ^١٥^ نبذبة فى الثانية للهيدروجين كنت مستخدمًا طاقة الحركة بالإضافة إلى طاقة الربط واستثنيت طاقة السكون. لكن كان هذا اختياريًا فقد كان بإمكانى إضافة طاقة السكون أيضًا إذا رغبت فى ذلك. وهذا يعنى أن التردد يكون غامضًا فى ميكانيكا الكم وهذا شيء مزعج.

وهنا سأوضح كيف يمكن أن تُحل هذه المعضلات. يمكنك التساؤل ماذا يحدث عندما يقفز إلكترون من مستوى طاقة إلى آخر؟ فإذا قفز الإلكترون إلى أسفل بالنسبة للطاقة فإنه يتخلص من الطاقة الزائدة عن طريق إشعاع فوتون. وتكون طاقة هذا الفوتون هى الفرق بين طاقة الإلكترون قبل القفز وبعده. وواضح أنه ليس مهمًا إضافة طاقة السكون للإلكترون لأن كل ما يهمنا هو فرق الطاقة فى المستويات قبل قفز الإلكترون وبعده. فالاستخدام الصحيح للصيغة $E = h\nu$ هو وضع E تساوى قيمة طاقة الفوتون وفى هذا الحالة تكون ν هى تردد الفوتون وهو رقم محدد دون غموض. يبقى الآن شيء واحد محتاج للإيضاح: ما بالضبط تردد الفوتون؟ وهذا ما أريد أن أشرحه فى الجزء المقبل.

الفوتون

لقرون عديدة كان هناك جدل ثائر فى الفيزياء: هل الضوء جُسيم أم موجة؟ قامت ميكانيكا الكم بحسم هذا الجدل بطريقة غير متوقعة: فالضوء جسيم وموجة معًا. لتقدير الخاصية الموجية للضوء تخيل إلكترونًا قرر أن يأخذ حمام شمس فى شعاع ليزر وشعاع الليزر هو شعاع ضوئى متماسك ومركّز. وهذا المثال يوضح الحل: فعندما يخترق الإلكترون شعاع الليزر فإنه يجذبه إلى ناحية ما ثم يجذبه إلى الناحية الأخرى بتردد معين وهذا التردد هو الذى يدخل فى المعادلة $E = h\nu$ ، والضوء المنظور له تردد أقل قليلاً من ١٠ ^١٥^ نبذبة فى الثانية.

وهذا التشابه يعتبر خياليًا لكن يمكننا أن نعطى مثالاً عمليًا. فموجات الراديو تُعتبر حقيقةً الشيء نفسه مثل الضوء لكن بتردد أقل كثيرًا. فموجات الراديو FM لها تردد نحو ١٠ ^٨ ذبذبة فى الثانية أو ١٠ ^٨ هرتز. وحيثما أعيش توجد واحدة من أشهر محطات الإذاعة وهى نيوجيرسى ١٠١,٥ التى تذيع على تردد ١٠١,٥ ميجا هرتز. ويمثل واحد ميجا هرتز مليون هرتز وبالتالى فإن ١٠٠ ميجا هرتز = ١٠ ^٨ هرتز. وبالتالى فإن ١٠١,٥ ميجا هرتز هى أكثر قليلاً من١٠ ^٨ ذبذبة فى الثانية. ويُصمم جهاز الراديو FM بحيث إن الإلكترونات بداخله تتذبذب بمثل هذا التردد. فعندما تفتح جهاز الراديو فإنك تضبط التردد الذى تتذبذب به الإلكترونات داخل الدائرة الكهربائية. وهذا يشبه الإلكترون فى المثال السابق ذا حمام الشمس. فإن الإلكترونات داخل جهاز الراديو تتخلل موجات الراديو التى تسقط على الجهاز.

وهناك تشابه آخر ربما يساعد على الفهم وهو المركب فى المحيط. ويكون المركب مشدودًا بسلسلة إلى المرساة الموجودة بقاع المحيط حتى لا يجرى بعيدًا بالأمواج والتيارات المائية. والطريقة التى يستجيب بها للأمواج هى أنه يرتفع وينخفض لكن يظل على سطح الماء. وهذا يشبه استجابة إلكترون الحمام الشمسى لشعاع الليزر. وهناك جزء آخر من قصة إلكترون الحمام الشمسى: فى آخر الأمر يتم دفعه فى اتجاه شعاع الليزر إلا إذا كان مربوطًا بطريقةٍ ما مثل المركب.

وحتى الآن كان الشرح يركز على الخاصية الموجية للضوء فكيف له أن يتصرف كجسيم؟ هناك خاصية شهيرة تُسمى التأثير الكهروضوئى التى تؤكد أن الضوء يتكون حقيقةً من فوتونات كل منها له طاقة $E = h\nu$ ، وسنقوم بشرح كيف يتم هذا. إذا قمت بتركيز ضوء على معدن فإنك تدفع الإلكترونات إلى الانبعاث من هذا المعدن. وعن طريق جهاز دقيق يمكن الكشف عن هذه الإلكترونات وحتى قياس طاقتها. وتتفق نتائج هذه القياسات مع الشرح التالى. حيث

إن الضوء يتكون من فوتونات كثيرة فإنه يُعطى سلسلة من الصدمات الدقيقة إلى المعدن. وتحدث كل صدمة عندما يصدم فوتون واحدًا من الإلكترونات داخل المعدن. وعندما يكون للفوتون طاقة كافية فيمكنه أن يخرج الإلكترون من المعدن. وطبقًا للمعادلة $E = h\nu$ فإن التردد العالى يعنى طاقة عالية. ومن المعلوم أن الضوء الأزرق له تردد أعلى تقريبًا ٣٥% من الضوء الأحمر. وهذا يعنى أن الفوتون الأزرق له ٣٥% طاقة زائدة على الفوتون الأحمر. وبافتراض أنك تستخدم الصوديوم لدراسة التأثير الكهروضوئى، فإذا حدث أن الفوتون الأحمر لم يكن له طاقة كافية لإخراج الإلكترونات من الصوديوم فعندئذ لن ترى أى إلكترونات منبعثة حتى إذا جعلت الضوء الأحمر ذا بريق شديد. ولكن الفوتونات الزرقاء لها من الطاقة ما يكفى لإخراج الإلكترونات من الصوديوم. وحتى إذا كان الضوء الأزرق خافتًا فإنه يستطيع القيام بهذا الدور. وبالتالى فليس المهم هو البريق (وهو مرتبط بعدد الفوتونات) ولكن لون الضوء هو الذى يحدد الطاقة لكل فوتون.

وأقل تردد للضوء يكفى لإخراج الإلكترونات من الصوديوم هو ٥,٥ × ١٠ ^١٤^ ذبذبة فى الثانية وهو ما يعنى أن الضوء لونه أخضر. والطاقة المناظرة لهذه الحالة طبقًا للمعادلة $E = h\nu$ تساوى ٢,٣ إلكترون فولت. والإلكترون فولت الواحد هو كمية الطاقة التى يكتسبها إلكترون واحد عندما يُدفع بمصدر قدرته ١ فولت. وبالتالى فإن القيمة العددية لثابت بلانك تكون ٢,٣ إلكترون فولت مقسومة على ٥,٥ × ١٠ ^١٤^ ذبذبة فى الثانية، وهو غالبًا ما يكتب ٤,١ × ١٠ ^-١٥^ إلكترون فولت – ثانية.

واختصارًا فإن الضوء يتصرف كموجة فى ظروف كثيرة وكجسيم فى ظروف أخرى وهو ما يسمى ثنائية الموجة – الجسيم. وطبقًا لميكانيكا الكم فإنه ليس الضوء فقط الذى له ثنائية الموجة – الجسيم لكن كل الأشياء لها الخاصية نفسها.

دعنا نعود إلى ذرة الهيدروجين للحظة. حاولت أن أشـرح فـى المقطـع السابق كيف يمكن اعتبار مستويات الطاقة المكماة كموجات ساكنة بترددات محددة. وهذا مثال عن كيفية تصرف الإلكترونات كموجات. لكن لو تـذكرت كيـف أنـى حاولت شرح معنى التردد. لقد ذكرت لك الصيغة $E = h\nu$ لكن كانـت هنـاك مشكلة هل الطاقة E فى الصيغة تـشمل طاقـة الـسكون للإلكتـرون؟ وبالنـسبة للفوتونات لا توجد مثل تلك الصعوبة فتردد الضوء يعنى شيئًا ملموسًا، فهو التـردد الذى تضبط عليه جهاز الراديو لتستقبل الموجات. وبالتالى فعندما يقفز إلكترون من مستوى طاقة إلى آخر مع إشعاع فوتون واحد فى هذه العملية يمكنك استخدام تردد الفوتون لحساب قيمة فرق الطاقة بين المستويين بدقة.

آمل أن تكون المناقشة السابقة قد أعطتك إحساسًا جيدًا عن حقيقة الفوتونات. ولكن الفهم الكامل به صعوبة شديدة. وتعتمد تلك الصعوبة علـى مفهـوم يـسمى التماثل المقياسى الذى سوف أناقشه بإفاضة فى الفصل الخامس. وفى المتبقى مـن هذا القسم دعنا نكتشف كيف أن الفوتونات تمثل مفاهيم متداخلة من النسبية الخاصة وميكانيكا الكم.

تعتمد نظرية النسبية أساسًا على الفرض أن الضوء فى الفراغ يـسير دائمًـا بالسرعة نفسها (٢٩٩,٧٩٢,٤٥٨ متر فى الثانية) ولا يوجد شىء يسير أسرع مـن ذلك. ربما يدعى البعض أن هذا غير صحيح وذلك بافتراض تـسريع نفـسك إلـى سرعة الضوء ثم إطلاقك مسدسا فى اتجاه حركتك فإن الرصاصة سـتكون حينئـذ أسرع من سرعة الضوء. هل هذا صحيح؟ لا هذا خطأ. والمشكلة هنا متعلقة بتمدد الزمن. لنتذكر كيف أنى أشرتُ إلى أن الزمن يمر أبطأ ألف مرة بالنسبة للجسيمات المتحركة فى مسرعات الجسيمات الحديثة. وهذا بسبب أنها تتحـرك قريبًـا مـن سرعة الضوء. وبالتالى فبدلاً من التحرك قريبًا من سرعة الـضوء فلـو تحركـت بالفعل بسرعة الضوء فإن الزمن يتوقف بالكامل وبالتالى فلن تـستطيع أن تُطلـق المسدس لأنه لن يكون لديك الوقت لجذب الزناد.

ربما ينصحك شخصٌ ما بأن تسرع نفسك حتى أقل مـن سـرعة الـضوء بعشرة أمتار فى الثانية. ومرور الزمن فى هذه الحالة سوف يكون بطيئًا جدًا لكـن فى النهاية سوف تتمكن من إطلاق طلقة مسدسك. عندما تفعل هـذا فـإن الطلقـة سوف تتحرك بالنسبة لك أسرع كثيرًا من ١٠م ١ ث وبالتأكيد سوف تتعدى سرعتها سرعة الضوء. هل هذا صحيح؟ حسنًا إن هذا يمكن أن يحدث بهذه الطريقة فكلمـا كنت أسرع كان أصعب أن تجعل أى شىء يتحرك أسرع منك. وهذا ليس بـسبب مواجهتك لرياح فإن هذا التأثير يمكن أن يحدث فى الفضاء الخارجى حيث لا توجد رياح. فهذا التأثير يعتمد على علاقات متشابكة بين الزمن والطول والسرعات فـى النسبية الخاصة. فكل شىء فى النسبية مُصوغ لإحباط أى محاولة للتحرك أسـرع من سرعة الضوء. وبسبب النجاحات المتعددة للنسبية فى وصف العالم فإن معظـم الفيزيائيين قد قبلوا مبدأها: لا يمكنك أن تسير أسرع من الضوء.

وماذا عن الفرض الآخر الذى يقول إن الضوء يسير دائمًا بالسرعة نفـسها فى الفراغ؟. يمكن اختبار هذا الفرض تجريبيًا ويبدو أنه صحيح بصرف النظر عن تردد الضوء المستخدم. مما يعنى أنه يوجد اختلاف شـديد مـا بـين الفوتونـات والجسيمات الأخرى مثل الإلكترونات والبروتونات. فالإلكترونـات والبروتونـات يمكن أن تكون سريعة أو بطيئة. فعندما تكون سريعة فسيكون لديها كمية كبيرة من الطاقة. أما إذا كانت بطيئة فسيكون لها طاقة أقل. ولكن الإلكترون لا يمكن أن تقـل طاقته عن طاقة السكون $E = mc^2$ وهذا ينطبق أيضًا على البروتونـات. أمـا طاقة الفوتون $E = h\nu$ فإنها غير محدودة. فإن التردد ت يمكن أن يكون كبيـرًا أو صغيرًا كما نحب دون تغيير سرعة الفوتون. وعلى الأخص فإنه لا يوجـد حـد أدنى لطاقة الفوتون وهذا يعنى أن طاقة سكون الفوتون تساوى صفرًا. وباسـتخدام المعادلة $E = mc^2$ فإننا نصل إلى استنتاج أن كتلة الفوتون تساوى صفرًا وهذا اختلاف أساسى بين الفوتون ومعظم الجسيمات الأخرى: ليس للفوتون كتلة.

ومن المهم أن تعرف أن الضوء له سرعة ثابتة فقط فى الفـــراغ. فالـــضوء يخفض من سرعته عندما يمر خلال المادة. وهذه الحالة مختلفة كليةً عـــن الـــضوء المنظور الذى يصطدم بمادة الصوديوم: فعلى العكس فأنا أفكر هنا فى الضوء الذى يمر خلال مواد شفافة مثل الماء أو الزجاج. فعند مروره خلال الماء فـــإن الـــضوء يبطئ بمعدل نحو ١,٣٣ وعندما يمر خلال الزجاج يمكن أن يبطئ أكثر لكن بما لا يزيد على معامل ٢. ويُبطئ الألماس الضوء بمعامل ٢,٤. وهذا المعامـــل الكبيـــر بالإضافة إلى نقاء الألماس يعطيه تألقًا فريدًا.

الفصل الثالث

الجاذبية والثقوب السوداء

منذ عدة سنوات في يوم صيف جميل كنت أقود سيارتي مع والدي صاعدًا إلى جروتووول وهي منطقة تسلق شهيرة بجوار مركز أسبن للفيزياء بكولورادو. وكنا نأمل في تسلق مرتفع قديم معتدل يسمى الصدع المزدوج. وبعد أن انتهينا دون حوادث فكرنا سريعًا في فكرة أخرى: وهي تسلق مرتفع أصعب يسمى كريوجينكس. ويعتمد هذا النوع من التسلق على وضع معدات داخل الصخور بما يعادل وزنك بدلاً من إمساك الصخور بالأيدي والأقدام. ثم تربط نفسك بحبل وتتسلق هذا الحبل حيث توجد معداتك التي وضعتها بحيث إن في حالة انتزاع المعدة التي تقف عليها من مكانها فإن المعدة التي تحتها سوف تمنع سقوطك.

وتُعتبر كريوجينكس منطقة ممتازة للتدريب على هذا النوع من التسلق لوجود عدد كبير من التدليات الصخرية. فإذا سقطت فلن تتزحلق بألم شديد على الصخور. لكن بالعكس سوف تسقط لمسافة بسيطة ثم تتدلى من الحبل. لكن من الممكن أن تسقط حتى تصطدم بالأرض ولكن هذا لا يبدو احتمالاً كبيرًا. والشيء الطيب الآخر بالنسبة لكريوجينكس كما أعتقد هو وجود شق بعرض إصبعين خلال كل مسافة التسلق مما يتيح لي أن أضع أكثر ما يمكن من العدد كما أرغب.

وقد اتفقت مع والدي، وبالتالي انطلقنا لمكان التسلق وعندئذ أدركتُ أن خطتي بها عوائق. لم يكن الصخر ضخمًا داخل الجرف وأمكنني وضع كثير من المعدات لكن لم يكن من السهل بالنسبة لي أن أحصل على قطعة منيعة بالداخل.

وبالرغم من أن الجرف كان قصيرًا فإنه قام بالتهام كل المعدات. وبالتالى عندما اقتربت من القمة كان لدى عجز خطير فى المعدات. وآخر جزء من التسلق كان هو الأصعب بالنسبة للتسلق الحر. ولم يكن لدى أى معدات متبقية. وقد وضعت صامولة فى شق متسع وقمت بالوقوف على حافتها وكانت لا تزال متماسكة. ثم وضعت معدة أخرى داخل الجرف ووقفت عليها ولكنها انزلقت من الجرف وسقطتُ. وما حدث بها بعدها مر كلحظة ولا أذكر شيئًا منه ولكنه كان كافيًا لإعادة حساباتى.

وعندما خرجت الصامولة من الشق سقطتُ فى الفضاء ثم انزلقت أيضًا الصامولة الأخرى. ويسمى المتسلقون هذه الظاهرة بفتح السوستة فهى تشبه عملية فتح السوستة فى الملابس. وإذا سقطت قطع كثيرة فسوف تصطدم بالأرض. وكلما سقطت قطعة فإن القطعة السفلية يجب عليها أن تقاوم بشدة أكبر. لأنك حصلت على سرعة أكبر وكمية حركة أكبر. وبسبب سقوطى فى الفراغ فإن والدى الذى كان ممسكًا بالحبل وجالسًا على الأرض قد تزحلق للأمام بسبب أن الحبل بيننا أصبح مشدودًا جدًا.

وقد أمضيت بعض الوقت دارسًا للمعدات التى تحكمت فى سقوطى وكانت تبدو أنها شُدت ودارت قليلاً ولكنها كانت لا تزال مضبوطة. فقمت بعد ذلك بتحسين وضع بعض المعدات أسفلها ثم خفضت التسلق. وقد قمت بالتجول لدقائق مفكرًا كيف أن الأرض صلبة هكذا. ثم أخذت فى التسلق على الحبل ثانيةً ثم جمعت معظم معداتى.

ماذا يمكن أن نتعلم من خبرتى فى كريوجينكس؟ حسنًا فإن أول شيء عند التسلق بالآلات أنه يجب التوقف عندما تنفد منك هذه الآلات.

والشيء الثانى أن السقوط ليس مشكلة ولكن الوصول إلى الأرض هو المشكلة. فقد خرجت من التسلق دون أى خدوش لأنى لم ألمس الأرض.

(وقد حدث لى نزيف بالأنف بعد عدة دقائق). بالنظر إلى نفاد المعدات نعتقد أنه مثل الرعشة ولكنه نوع لطيف من الرعشة بالمقارنة إلى السحق الهائل الناتج من الاصطدام بالأرض.

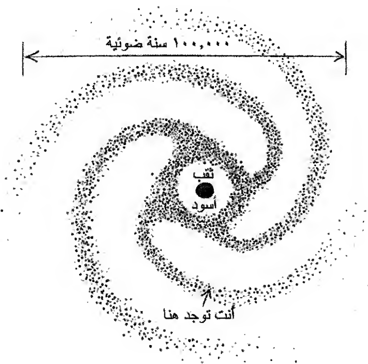
وهناك درس عميق حول الجاذبية يمكن أن نتعلمه من السقوط، فأثناء السقوط لا تشعر بالجاذبية وتشعر أنك دون وزن. وتحصل على إحساس مماثل بدرجة أقل عندما يتحرك بك مصعد لأسفل. وأود أن أخبرك أنى لدى نوع من التقدير الأعمق للجاذبية اعتمادًا على خبرتى الخاصة بموضوع السقوط. والحقيقة أنه فى كريوجينكس إما أنه لم يكن لدىَّ الوقت لتقدير هذه الخبرة أو لم أخطط جيدًا بتفكير سليم لعدم الاصطدام بالأرض.

الثقوب السوداء

ماذا سوف تكون عليه الحال فى حالة سقوطك فى ثقب أسود؟ هل تكون هناك صدمة ساحقة مرعبة؟ أو هل تسقط إلى الأبد؟ دعنا نأخذ جولة لدراسة خصائص الثقوب السوداء لنحصل على الإجابات.

أولاً فإن الثقب الأسود هو شىء لا يمكن للضوء الفرار منه. كلمة أسود تعنى الظلام التام لهذا الشىء. ويُسمى سطح الثقب الأسود أفقًا وذلك لعدم استطاعة أى شخص خارج هذا الأفق رؤية ما يحدث بالداخل. وهذا بسبب أن الرؤية معتمدة على الضوء ولا يستطيع الضوء أن يهرب من الثقب الأسود: ويُعتقد أن الثقوب السوداء توجد فى منتصف معظم المجرات. ويُعتقد أيضًا أنها تُمثل المرحلة الأخيرة فى تطور النجوم ذات الكتل الكبيرة جدًا.

وأغرب شيء عن الثقوب السوداء أنها مجرد فضاء فارغ عدا المفردة الموجودة فى مركزها. وربما يبدو هذا أنه دون معنى: كيف يمكن أن تكون كتلة أثقل الأشياء فى المجرة مجرد فضاء فارغ؟ والإجابة أن كل الكتلة داخل الثقب تنهار إلى المفردة. ونحن لا نستطيع تفهم بالضبط ماذا يحدث عند المفردة وما نفهمه هو أن المفردة تشوه الزمكان بطريقة تجعل هناك أفقًا يحيط به. وأى شيء بداخل هذا الأفق سوف يُسحب فى النهاية إلى هذه المفردة.



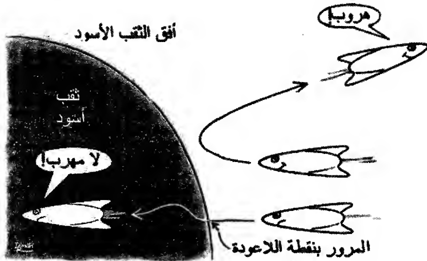
ربما تحتوى مجرتنا (الطريق البنى) ثقبًا أسود فى مركزها ويعتقد أن كتلة الثقب الأسود نحو ٤ ملايين ضعفًا من كتلة الشمس. ومن منظورنا على الأرض يقع الثقب فى اتجاه برج القوس ويبعد عنا نحو ٢٦,٠٠٠ سنة ضوئية. وحجم الثقب الأسود أصغر بكثير من المرسوم هنا وأيضًا المنطقة المحيطة به والخالية من النجوم.

تخيل متسلقًا للصخور أوقعه حظه السيئ في السقوط في ثقب أسود. لن يسبب عبوره للأفق أي جراح لأنه لا يوجد أي شيء فهو فضاء فارغ. وربما لا يشعر المتسلق حتى إنه سقط خلال الأفق. المشكلة أنه لا يوجد أي شيء يمكن أن يوقف سقوطه أولاً لأنه لا يوجد أي شيء يتمسك به حيث إن كل ما بداخل الثقب الأسود هو فضاء فارغ ما عدا المفردة. والأمل الوحيد للمتسلق يكمن في حبله: لكن حتى لو كان الحبل مُثبتًا في أكثر القطع مناعةً المشار إليها آنفا فلن ينفعه بشيء. فيمكن للمعدات أن تثبت في مكانها ولكن الحبل سينقطع أو يمكن له أن يستطيل ويستطيل حتى يصطدم المتسلق بالمفردة. وعندما يحدث هذا فإن الاصطدام حتمًا سيسبب له ألما شديدًا مصحوبًا بصدمة ساحقة. لكن من الصعوبة التأكد من هذا بسبب عدم استطاعة أي إنسان أن يلاحظ هذا عدا المتسلق نفسه وهذا بسبب عدم قدرة الضوء على الإفلات من الثقب الأسود.

والشيء الأساسي الذي يمكن أن يُستنتج من هذه المناقشة أن شد الجاذبية داخل الثقب الأسود لا تمكن مقاومته إطلاقًا. فبمجرد مرور المتسلق سيئ الحظ بالأفق فلن يستطيع منع سقوطه كما لن يستطيع إيقاف الزمن أيضًا. وبالتالي فلن يؤذيه أي شيء حتى اصطدامه بالمفردة. وحتى هذه اللحظة يكون كل ما يفعله هو السقوط في فضاء فارغ. وسوف يشعر أنه دون وزن كما شعرت عند سقوطي من كريوجينكس. وهذا يمثل مبدأ أساسيًا في النسبية العامة: الملاحظ الذي يسقط سقوطًا حرًا يشعر بأنه في فضاء فارغ.

ويوجد تشابه آخر ربما يساعد على الفهم. تخيل بحيرة موجودة في الجبال يخرج منها تيار سريع من الماء. فالأسماك الموجودة في البحيرة تعلم أنه لا ينبغي لها الاقتراب من منبع هذا التيار، لأنها إذا سقطت في هذا التيار فإنه من المستحيل بالنسبة لها أن تسبح سريعًا للتغلب على هذا التيار، والعودة ثانيًا إلى البحيرة. ولكن الأسماك الحمقاء التي تترك نفسها تتزلق مع التيار لا يحدث بها أي جروح (على

الأقل فى البداية). لكن لن يكون لديها الاختيار إلا متابعة الانزلاق داخل هذا التيار. وتمثل البحيرة هنا الزمكان خارج الثقب الأسود بينما داخل الثقب الأسود يُمثل بالتيار. وتمثل المفردة بصخور حادة ينتهى عليها التيار ويمثل النهاية العنيفة بالنسبة للأسماك الموجودة بالتيار. ويمكن أن تتخيل احتمالات أخرى: مثلاً ربما يؤدى التيار إلى بحيرة أُخرى يمكن للأسماك أن تصل إليها بأمان وراحة. وبالمثل ربما لا توجد مفردة داخل الثقب الأسود لكن ربما يوجد نفق إلى كون آخر. وربما يبدو هذا الشيء فاتنًا إلى حد ما. لكن بسبب عدم فهمنا التام للمفردة وعدم علمنا بما يتم داخل الثقب الأسود إلا بالسقوط داخله فلا يمكن إهمال هذا الفرض تمامًا.



يمثل أفق الثقب الأسود نقطة اللاعودة. ويمكن لسفينة فضاء أن تقترب منه ثم ترتد وتهرب. لكن إذا دخلت سفينة الفضاء داخل هذا الأفق فلن تستطيع الخروج.

ومن وجهة نظر الفيزياء الفلكية فهناك تحذير من أنك لن تشعر بأى شىء عند الاقتراب من الثقب الأسود وعبورك للأفق. وهذا التحذير مرتبط بقوة المد والجزر. وسمى قوة المد والجزر بهذا الاسم نظرًا لأنها تمثل كيف يمكن لموجات المد والجزر للمحيط أن تحدث. يجذب القمر بقوة أشد الجانب القريب له ولهذا يرتفع مستوى سطح البحر فى هذا الاتجاه كاستجابة لجذب القمر. والبحر فى الجانب الآخر من الأرض يرتفع أيضًا وربما يبدو هذا مضادًا للحدس. لكن لنحاول أن نفهمه بهذه الطريقة: يتم جذب وسط الأرض إلى القمر أكثر من المحيطات الموجودة فى الجانب العكسى للقمر. وهذه المحيطات ترتفع لأنها تُركت بمفردها. وكل شىء آخر عدا هذه المحيطات يتحرك نحو القمر أكثر منها لأن كل شىء آخر أقرب للقمر ويتم التأثير عليه بشدة أكثر.

وعندما يقترب شىء مثل النجمة إلى الثقب الأسود فإنه يوجد تأثير مشابه. فالأجزاء من النجمة القريبة من الثقب الأسود تُجذب إليه بشدة أكثر وبهذا يأخذ النجم فى الاستطالة كنتيجة لهذا. وعندما يقترب النجم من أفق الثقب الأسود يتم تمزيقه إلى قطع وهذا التمزيق يمثل قوة المد والجذب والحركة الدورانية للنجم حول الثقب الأسود. ولاستبعاد التعقيدات غير الضرورية دعنا نتجاهل الدوران ونفكر فى نجم يقترب مباشرة نحو الثقب الأسود. دعنا نقوم بتبسيط أكثر بالاستعاضة عن النجم بملاحظين يسقطان سقوطًا حرًا وتكون المسافة بينهما هى قطر النجم. ويمكن أن نتخيل أن مسار هذين الملاحظين يُفترض أن يُشابه مسارى أجزاء النجم الأقرب والأبعد عن الثقب الأسود. وسوف أُشير إلى الملاحظ الذى يبدأ حركته قريبًا من الثقب الأسود بالملاحظ قريب الجانب. والملاحظ الآخر هو بعيد الجانب. ويقوم الثقب الأسود بجذب الملاحظ القريب الجانب بشدة أكثر بسبب قربه مما يجعله يبدأ فى السقوط أسرع من الملاحظ بعيد الجانب مما يتسبب فى زيادة المسافة بينهما. ومن وجهة نظرهما يبدو هذا كقوة تبعدهما عن بعضهما. وهذه القوة الجديدة هى قوة المد والجزر التى ببساطة تُمثل التعبير عن الحقيقة أنه

عند أى زمن فإن الجاذبية تشد بقوة أكبر الملاحظ قريب الجانب عن الملاحظ بعيد الجانب.

ربما يمكن لتشابه آخر أن يُساعد أيضًا على الفهم. تخيل صفًا من العربات تبدأ فى الحركة فى مرور بطيء. وعندما تصل أول عربة إلى مكان حيث تستطيع أن تتسارع فإنها تبتعد عن العربة التى تليها. وعندما تصل العربة الثانية إلى المكان نفسه حيث يمكن أن تتسارع فسوف تظل هناك مسافة أكبر بينها وبين العربة الأولى. وهذا مشابه بالضبط للطريقة التى يتم بها زيادة المسافة بين الملاحظ قريب الجانب والملاحظ بعيد الجانب عندما يسقطان داخل الثقب الأسود. واستطالة النجم الساقط فى ثقب أسود تمثل بالضبط الظاهرة نفسها ما عدا أنه لإعطاء صورة حقيقية تمامًا لما يحدث يجب للمرء أن يُدخل الحركة الدائرية للنجم حول الثقب الأسود فى الاعتبار. وأيضًا تشوه الزمن بجوار أفق الثقب الأسود.

وتحاول التجارب الحديثة الكشف عن أحداث مثل سقوط نجوم داخل الثقوب السوداء أو سقوط ثقبين أسودين داخل كل منهما. وإحدى الأفكار الأساسية هى ملاحظة انفجار إشعاعات الجاذبية التى تحدث عندما يندمج شيئان ذوا كتل ضخمة. وإشعاعات الجاذبية ليست بالشيء الذى يمكن أن تراه بالعين المجردة لأن كل ما يمكن أن نراه هو الضوء. ولكن إشعاعات الجاذبية هى شيء مختلف تمامًا. فهى عبارة عن موجات مسافرة بسبب تشوه الزمكان. وهى تحمل الطاقة مثل الضوء ولها تردد ثابت مثلما يفعل الضوء. ويتكون الضوء من فوتونات وهى جسيمات دقيقة تُسمى كوانتا الضوء. ونعتقد أن إشعاع الجاذبية يتكون بالمثل من جسيمات دقيقة تُسمى جرافيتونات تخضع لنفس العلاقة $E = h\nu$ بين الطاقة (E) والتردد (ν) والتى تخضع لها الفوتونات أيضًا. وتسير الجرافيتونات بسرعة الضوء وليس لها كتلة.

وتتفاعل الجرافيتونات مع المادة بطريقة أضعف بكثير من الفوتونات وبالتالى فليس هناك أمل فى اكتشافها فى عملية تشابه التأثير الكهروضوئى. وعلى العكس فإن مشروع كشفها مرتبط بالطبيعة الأساسية لإشعاعات الجاذبية. فعندما تمر موجات الجاذبية بين شيئين فإن المسافة بينهما تتأرجح وهذا بسبب أن الزمكان بينهما أيضًا يتأرجح. وبالتالى فإن مشروع الكشف يعتمد على قياس المسافة بين الشيئين بدقة شديدة والانتظار حتى تتأرجح هذه المسافة. ولو نجح مثل هذا المشروع فسوف يفتح نافذة جديدة على الكون وسيكون أيضًا بمثابة تأكيد مباشر أكثر إثارةً لنظرية النسبية التى تتنبأ بإشعاعات الجاذبية بينما نظرية نيوتن السابقة للجاذبية لا تتنبأ بها.

النظرية النسبية العامة

لقد أخبرتك بالفعل بالكثير المتعلق بالنظرية النسبية العامة بطريقة غير مباشرة. إنها نظرية الزمكان التى تصف الثقوب السوداء وإشعاعات الجاذبية. والزمكان فى النسبية العامة ليس مجرد خلفية ثابتة تقع عليها الأحداث بل هندسة منحنية ديناميكية. وتُعتبر موجات الجاذبية كموجات صغيرة فى هذه الهندسة وهى تنتشر مثل الموجات الصغيرة التى تصنعها بإلقاء حجر فى بحيرة. ويشبه الثقب الأسود تيارًا يستنزف هذه البحيرة. وكلا التشبيهين السابقين غير تامين. والشىء الأساسى الناقص هو صيغة جديدة لتمدد الزمن والمتسقة مع أساسيات النسبية العامة.

أولاً دعونى أذكركم بتمدد الزمن فى النسبية الخاصة، فالزمكان يظل ثابتًا والباقى متعلقًا حول تصرف الأشياء عندما تتحرك بالنسبة لبعضها البعض. ويصف

تمدد الزمن كيف يمكن للزمن أن يبطئ عندما تكون متحركًا. فكلما تحركت أسرع أبطأ الزمن أكثر. وعندما تصل إلى سرعة الضوء فإن الزمن يتوقف.

وها هى المظاهر الجديدة لتمدد الزمن فى النسبية العامة. عندما تسقط بعمق فى بئر تجاذبية مثلما يُخلق بواسطة نجم ضخم فإن الزمن يبطئ. وعندما تصل إلى أفق ثقب أسود فإن الزمن يتوقف.

لكن انتظر فقد أخبرتك من قبل أنه لا يوجد شيء خاص بالنسبة لأفق الثقب الأسود عدا أنك إذا أسقطت فيه فإنك لا تستطيع أن تخرج ثانيةً. ولا يُعتبر عبور الأفق تجربة خاصة فكيف يمكن أن يحدث هذا إذا توقف الزمن عند أفق ثقب أسود؟ وحل هذا اللغز أن الزمن له منظور خاص. فإن متسلق الصخور الذى يسقط خلال الأفق يشعر بهذا الزمن بطريقة مختلفة عن الطريقة التى تشعر بها إذا كنت متأرجحًا فوق الأفق بمقدار بسيط. والمراقب البعيد عن الثقب الأسود له إحساس مختلف للزمن. فمن وجهة نظره فإن أى شيء يحتاج زمنًا لانهائيًا ليسقط داخل أفق. وإذا كان هذا المراقب يلاحظ متسلق الصخور يسقط فى الثقب الأسود فسوف يبدو أن هذا المتسلق يزحف قريبًا من الأفق، ولكنه لا يسقط فيه أبدًا. وبالنسبة لشعور المتسلق الخاص بالزمن فإنه يأخذ فقط جزءًا محددًا من الزمن ليسقط فى الأفق بإضافته إلى جزءٍ محددٍ آخر من الزمن ليصل إلى مركز الثقب الأسود حيث تكمن المفردة. ولذا يمكننى القول إن الزمن يبطئ بالنسبة للمتسلق لأن الثانية بالنسبة له تناظر وقتًا أطول بكثير بالنسبة للمراقب البعيد. ويبطئ الزمن أيضًا بالنسبة للمراقب الذى يحوم قريبًا من الثقب الأسود. وكلما اقترب أكثر من الأفق فإن الزمن يبطئ أكثر.

وكل هذا يبدو مجردًا بشدة لكن له نواتج فى العالم الحقيقى. فيبطئ الزمن على سطح الأرض أكثر منه فى الفضاء الخارجى. وهذا الاختلاف صغير جدًا فلا

يصل جزءًا من البليون ولكنه يُعتبر مهمًا بالنسبة لنظام الموضـعية العالميـة GPS والسبب أن اليقين الدقيق لقياسات الزمن جزء مما يمكن الـــ GPS مــن تحديــد الموقع بدقة على سطح الأرض. وقياسات الزمن تتأثر بتمـدد الــزمن بـسبب أن الأقمار الصناعية تدور حول الأرض وبسبب أنها ليست فـى قـاع بئـر جاذبيـة الأرض كما نحن فيه. والحساب الدقيق لتأثير تمدد الزمن عامل مهـم فـى جعـل GPS يعمل مضبوطًا كما يتم بالفعل.

ولقد ذكرت سابقًا أنه توجد علاقة بين تمدد الزمن وطاقة الحركـة دعـونى أذكركم بها. تُعتبر طاقة الحركة هى الطاقة الناشئة عن التحرك وتمدد الزمن يحدث عندما تكون فى حالة حركة. فعندما تتحرك سريعًا بحيـث إنـك تُـضاعف طاقـة السكون فإن الزمن يمر أبطأ بمقدار النصف. إذا تحركت أسرع بحيـث تـضاعف طاقة السكون أربع مرات فإن الزمن يمر أبطأ بمقدار الربع.

وهناك شيء مشابه تمامًا فى حالة الانحراف نحو الأحمر المتعلق بالجاذبيـة ولكنه مرتبط بطاقة التجاذب. وطاقة التجاذب هى كمية الطاقة التى تحصل عليهـا بسبب السقوط. فإذا سقط جُزء من الحطام نحو الأرض فإن الطاقة التـى يحـصل عليها بسبب السقوط أقل قليلاً من واحد من بليون من كتلة سكونه. وليست مصادفة أن هذه تماثل الكسر الصغير الذى يميز كمية الانحراف الأحمر المتعلق بالجاذبيـة الموجود على سطح الأرض. وتُعتبر الجاذبية هى مرور الزمن بمعـدلات مختلفـة فى أماكن مختلفة. وفى الحقيقة هذا هو كل ما يخص موضوع الجاذبيـة بـافتراض أن مجالات الجاذبية ليست قوية جدًا. فتسقط الأشياء من الأماكن حيث الزمن يمـر أسرع إلى أماكن حيث يمر أبطأ، وهذا الشد لأسفل الذى تشعر بـه الـذى نـسميه الجاذبية هو المعدل المتغير لمرور الزمن مـن الأمـاكن العاليـة إلـى الأمـاكن المنخفضة.

الثقوب السوداء ليست حقيقةً سوداء

يرجع اهتمام علماء الوتر بالثقوب السوداء بسبب خـواص ميكانيكـا الكـم الخاصة بهذه الثقوب. وتقوم ميكانيكا الكم بإلقاء الخاصية المميزة للثقوب الـسوداء رأسًا على عقب. فلم تصبح آفاق الثقب الأسود سوداء ولكنها تتـوهج مثـل الفحـم الحيّ. ولكن توهجها صغير جدًا وبارد جدًا على الأقل إذا كنا نتكلم عـن الثقـوب السوداء ذات الصلة بالفيزياء الفلكية. ومعنى توهج أفق الثقوب السوداء هو أن لهـا درجة حرارة مرتبطة بقوة الجاذبية الموجودة على سطح الثقب الأسود. وكلما كـان الثقب الأسود كبيرًا كانت حرارته أقل. على الأقل إذا كنا نتكلم عن الثقوب السوداء ذات الصلة بالفيزياء الفلكية.

ويبدو أن درجة الحرارة تظهر مرة أخرى وبالتالى فمن الأفضل أن نناقـشها بدقة أكثر. والطرق المثلى لفهمها هى بربطهـا بالطاقـة الحراريـة أو الحـرارة. فالحرارة فى كوب من الشاى تأتى من الحركة الميكروسـكوبية لجزيئـات المـاء. وعندما تبرد الماء فإنك تمتص الطاقة الحرارية. وكل جزىء من جزيئـات المـاء يتحرك بنشاط أقل فأقل وفى نهاية الأمر يتجمد الماء ويصبح ثلجا. ويحدث هذا عند درجة حرارة صفر سيليزى. ولكن جزيئات الماء فى الثلج لا تزال تتحرك حركـة بطيئة: فهى تتذبذب حول موضع اتزانها داخل بلورة الثلج. وكلما أبردت الثلج أكثر فأكثر فإن هذه التذبذبات تصبح أضعف فأضعف. وفـى النهايـة عنـد درجـة – ٢٧٣,١٥ درجة سيليزى (والتى تكافئ –٤٥٩,٦٧ درجـة فهرنهايـت) فـإن كـل التذبذبات تتوقف تقريبًا: وجزيئات الماء تكون ثابتة فى مواضع التوازن بما يـسمح مبدأ عدم اليقين الكمى. ولا يمكن أن تصل بشىء إلى درجة أبرد مـن – ٢٧٣,١٥ سيليزى لأنه لا توجد أى طاقة حرارية متبقية لتمتص منها. ودرجة البـرودة هـذه تسمى درجة الصفر المطلق.

ومن المهم أن نلاحظ أن ميكانيكا الكم تمنع جزيئات الماء من التوقف كليةً عن التذبذب حتى عند درجة الصفر المطلقة. دعنا نوضح هذا قليلاً. فإن مبدأ عدم اليقين ينص على $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$ وفى داخل بلورة الثلج فإنك تعرف بدقة أين يوجد كل جزىء للماء وهذا يعنى أن Δx صغيرة جدًا: بالتأكيد أقل من المسافة بين كل جزيئين متجاورين من الماء. ولو كانت Δx صغيرة فعلاً فإن Δp لا يمكن أن تكون صغيرة جدًا. وبالتالى فطبقًا لميكانيكا الكم فإن جزيئات الماء لا تزال نشيطة قليلاً حتى لو كانت كجسيم مجمد فى مكعب من الثلج عند درجة الصفر المطلق. وهناك بعض الطاقة المرتبطة بهذه الحركة التى تُدعى "طاقة نقطة الصفر الكمية". وقد قابلناها سابقًا عند مناقشة ذرة الهيدروجين. وقد تتذكر أننى قارنت أقل طاقة للإلكترون فى ذرة الهيدروجين بالتردد الأساسى لوتر البيانو. فالإلكترون لا يزال يتحرك كل من موضعه وكمية حركته لها بعض من عدم اليقين. وبعض الناس يصف هذا بقولهم إن الإلكترون يخضع لتموجات كمية. وطاقة الحالة الأرضية له يمكن أن تُسمى طاقة نقطة الصفر الكمية.

وباختصار فإنه يوجد نوعان من التذبذبات التى تحدث داخل مكعب الثلج: تذبذبات حرارية وتموجات كمية. ويمكنك التخلص من التذبذبات الحرارية بإيراد الثلج حتى الصفر المطلق. لكن لا يمكنك أن تتخلص من التموجات الكمية.

وفكرة طاقة الصفر المطلق مفيدة جدًا لدرجة أن الفيزيائيين غالبًا ما يسندون درجة الحرارة بالمقارنة بها. وهذه الطريقة فى إسناد درجة الحرارة تُسمى تدريج كلفن. فواحد كلفن يمثل درجة واحدة فوق الصفر المطلق أو – ٢٧٢,١٥ درجة سيليزى ، ودرجة ٢٧٣,١٥ كلفن تمثل درجة صفر سيليزى وهى الدرجة التى عندها ينصهر الثلج. وإذا قمت بقياس درجة الحرارة على تدريج كلفن فإن طاقة التذبذبات الحرارية تُعطى بالمعادلة البسيطة: $E = k_B T$ ، حيث k_B تدعى "ثابت".

وكمثال فإنه عند نقطة انصهار الثلج تخبرنا هذه الصيغة أن طاقة التذبذبات الحرارية لجزىء ماء واحد هى واحد من الأربعين من الإلكترون فولت. وهذا تقريبًا يكافئ أقل من واحد من مائة جزء من كمية الطاقة التى تحتاجها لنقذف بالإلكترون خارج ذرة الصوديوم التى تساوى كما ربما تتذكر فى فصل ٢ نحو ٢,٣ إلكترون فولت.

وسوف أذكر لك بعض درجات الحرارة المهمة لتزداد إحساسًا بمقياس كلفن. فيتحول الهواء إلى سائل عند درجة حرارة ٧٧ كلفن التى تكافئ – ٣٢١ فهرنهايت. ودرجة حرارة الغرفة (تقريبًا ٧٢ فهرنهايت) نحو ٢٩٥ كلفن. ويستطيع الفيزيائيون أن يبرِّدوا الأشياء الصغيرة إلى أقل من واحد من الألف من الكلفن. وفى الطرف الآخر فإن سطح الشمس له درجة حرارة أقل قليلاً من ٦٠٠٠ كلفن، ومركز الشمس نحو ١٦ مليون كلفن.

والآن ما علاقة كل هذا بالثقوب السوداء؟ فالثقب الأسود لا يبدو أنه يتكون من جزئيات صغيرة لها ذبذبات يمكن أن تُصنف كذبذبات حرارية أو كمية. بالعكس فإن الثقب الأسود يتكون فقط من فضاء فارغ، أفق، ومفردة. لكن يبدو أن الفضاء الفارغ شىء معقد حقًا فهو يشعر بالتموجات الكمية والتى يمكن وصفها بطريقة عامة كخلق وإبادة لحظية لزوج من الجسيمات. فلو تكوَّن زوج من الجسيمات بجوار أفق الثقب الأسود فإنه من الممكن أن يحدث أن أحد هذه الجسيمات يسقط داخل الثقب الأسود والآخر يهرب محملاً بطاقة بعيدًا عن الثقب الأسود. وهذا النوع من العمليات ما يمكن أن يُعطى الثقب الأسود درجة حرارة لا صفرية. ولنضع هذا بصورة أكثر دقة فإن الأفق يحول جزءًا من التموجات الكمية للزمكان إلى طاقة حرارية.

والإشعاع الحرارى من الثقب الأسود خافت جدًا يناظر درجة حرارة صغيرة جدًا. وكمثال لنعتبر ثقبًا أسود تكون فى انهيار تجاذبى لنجم ثقيل. هذا

الـثقب الأسود يمكنه أن يحـتوى عدة مـرات من الكتلة مـثل الـشمس ودرجـة حرارته ستكون تقريبًا ٢ × ١٠ ^٨ كلفن. والثقـوب الـسوداء فـى مراكـز معظـم المجرات أثقل ملايين أو حتى بلايين المرات من الشمس. ودرجة حـرارة الثقـب الأسود ذى كتلة ٥ ملايين مرة من الشمس سوف تكون تقريبًا ١٠ ^١٤ كلفن.

وما يفتن نظريىّ الوتر ليس الصغر الشديد لدرجة حرارة أفق الثقب الأسـود لكن إمكانية وصف أشياء معينة فى نظرية الوتر تُسمى أغشية D كثقـوبٍ سـوداء صغيرة جدًا. ويمكن لهذه الثقوب السوداء الصغيرة جدًا أن يكون لها مجال واسـع من درجات الحرارة بدءًا من الصفر المطلق إلى درجات حرارة عاليـة. وتـربط نظرية الوتر بين درجة حرارة الثقوب السوداء الصغيرة بالتذبذبات الحرارية علـى أغشية D. وسوف أقدم أغشية D بدقة أكثر فى الفصل القادم. وسـوف أخبـركم أكثر كيف ترتبط بالثقوب السوداء الصغيرة فى الفصل الخامس. وتُعتبر هذه العلاقة هى قلب المجهودات الحديثة لفهم ما يحدث عند تصادمات الأيونات الثقيلة باستخدام نظرية الوتر كما سوف أناقش فى الفصل الثامن.

الفصل الرابع

نظرية الوتر

عندما كنت فى السنة الثانية فى برنستون درست منهجًا حول التاريخ الرومانى وكان معظمه حول الجمهورية الرومانية. إنه من المدهش كيف أن الرومان أحرزوا إنجازات سلمية وحربية معًا. ولقد قاموا بتطوير قانون غير مكتوب وبعض الدرجات فى الديمقراطية وفى الوقت نفسه تمكنوا من زيادة قدرتهم العسكرية بالنسبة للدول المجاورة ثم شبه الجزيرة الإيطالية. وفى النهاية كل منطقة البحر المتوسط وما خلفها. ومن المدهش كذلك كيف أن الكفاح المدنى لآخر الجمهوريات انتهى بحكم استبداد للإمبراطورية.

وتُعتبر لغتنا ونظامنا القانونى كأصداء من روما القديمة، وكمثال انظر إلى ظهر ربع الدولار فإذا كان تم إصداره قبل ١٩٩٠ فإنه يُظهر نسرًا يجثم على حزمة العصِيّ. تُمثل هذه الحزمة رمزًا رومانيًا للقوة والسلطة. وقد قام الرومان أيضًا بإسهامات مؤثرة فى الآداب والفنون والعمارة الحديثة والتخطيط والتكتيك والاستراتيجية العسكرية. وباعتناق الإمبراطورية الرومانية للمسيحية أصبحت المسيحية الديانة السائدة الآن.

وبالرغم من استمتاعى بالتاريخ الرومانى فلم أكن لأتحدث عنه هنا ما لم يُذكرنى بما أريد أن أتكلم عنه: وهو نظرية الوتر. فنحن متأثرون بعمق بالرومان بالرغم من أننا متباعدون عنهم زمنيًا بعدة قرون. وتصف نظرية الوتر – إذا كانت صحيحة – الفيزياء على مقياس طاقة أعلى بكثير من الذى يمكن أن نتعامل معه

مباشرةً. وإذا استطعنا التعامل بمقياس الطاقة الذى تصفه نظرية الوتر فمن المحتمل أن نرى الأشياء الغريبة التى سوف أنوى التحدث عنها: الأبعاد الإضافية، أغشية د، الثنائيات وما شابهها. وهذه الفيزياء الغريبة تُشكل أساس العالم الذى نعيشه (بافتراض أن نظرية الوتر صحيحة) تمامًا كما أن الحضارة الرومانية تشكل أساسًا لحضارتنا الآن. ولكن نظرية الوتر بعيدة عن خبرتنا بالعالم الذى نعيشه ليس بقرون من الزمن لكن بفراغ هائل بالنسبة لمقياس الطاقة. ويجب على معجلات الجسيمات أن تكون أقوى بمئات التريليونات من المرات من المعجلات الحالية حتى تصل إلى مقياس الطاقة التى تُمكننا من شعورنا بالأبعاد الإضافية والتأثيرات الوترية مما يمكننا من ملاحظتها مباشرةً.

وهذا الفراغ الهائل فى مقياس طاقة يؤدى بنا إلى أكثر الأشياء غير المريحة بالنسبة لنظرية الوتر: من الصعوبة اختبارها. وفى الفصلين السابع والثامن سوف أُخبركم عن المجهودات المبذولة لربط نظرية الوتر بالتجارب العملية. ولكن فى هذا الفصل والتاليين له سوف أحاول أن أؤسس نظرية الوتر على حدودها الخاصة دون محاولة ربطها بالعالم الحقيقى. وهذه الفصول تُشبه مختصرًا للتاريخ الرومانى. ولقصة الرومان التفافات ودورات كثيرة تصعب ملاحقتها. ونحن ندرس الرومان ليس لفهم عالمهم فقط لكن خلال عالمنا نحن. ولنظرية الوتر أيضًا بعض الالتواءات والدورات المدهشة. ولا أتوقع أن يكون تفسيرى لها دائمًا بالسهولة الكافية لفهمها. لكن على الأقل توجد فرصة أن الفهم العميق لنظرية الوتر فى النهاية سيكون الأساس لفهم عالمنا.

وسنأخذ ثلاث خطوات مهمة لفهم نظرية الوتر فى هذا الفصل. الخطوة الأولى هى فهم كيف يمكن لنظرية الوتر أن تحل التوتر الأساسى بين الجاذبية وميكانيكا الكم. والخطوة الثانية هى فهم كيف يمكن للأوتار أن تتذبذب وتتحرك فى الزمكان. والخطوة الثالثة هى إلقاء نظرة سريعة كيف يمكن للزمكان ذاته أن يظهر خلال الوصف الرياضى الواسع للأوتار.

الجاذبية مقابل ميكانيكا الكم

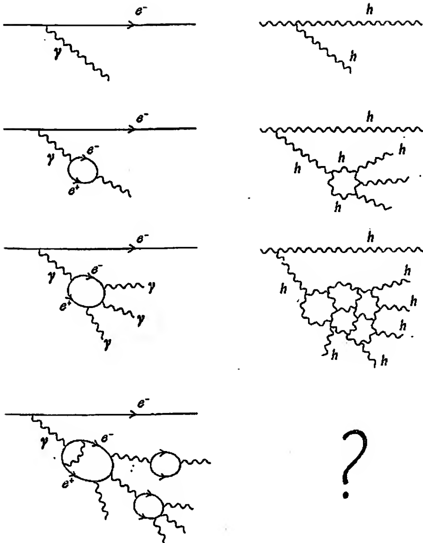
تُعتبر ميكانيكا الكم والنسبية العامة هما أعظم انتصارات الفيزياء أوائل القرن العشرين. لكن ظهر أنه من الصعوبة توفيق كل منهما مع الآخر. وتتعلق الصعوبة بمفهوم يُسمى إعادة الاستنظام. وسوف أشرح إعادة الاستنظام بمقارنة الفوتونات والجرافيتونات اللذين تمت مناقشتهما فى فصول سابقة. والنتيجة هى أن الفوتونات تُؤدى إلى نظرية قابلة لإعادة الاستنظام (وهذا يعنى نظرية جيدة) بينما الجرافيتونات تؤدى إلى نظرية غير قابلة لإعادة الاستنظام وهذا يعنى حقيقةً لا نظرية على الإطلاق.

فالفوتونات تستجيب للشحنة الكهربائية بينما هى فى ذاتها غير مشحونة. فكمثال فإن الإلكترون فى ذرة الهيدروجين يكون مشحونًا وعندما يقفز من مستوى طاقة إلى آخر فإنه يشع فوتونًا وهذا ما أعنيه بقولى إن الفوتونات تستجيب للشحنة. بينما قولى إن الفوتونات ليست مشحونة يماثل القول إن الضوء لا ينتج كهرباء وإلا فإنك ستحصل على صدمة كهربية من لمسك أى شىء معرض للشمس لمدة طويلة. والفوتونات لا تستجيب لبعضها البعض لأنها فقط تستجيب للشحنة الكهربائية.

ولا تستجيب الجرافيتونات للشحنة الكهربائية لكن للكتلة والطاقة. ولأنهما تحملان طاقة فإنهما تستجيبان لبعضهما البعض وتتجاذبان مع بعضها البعض. وربما لا يبدو هذا بالمشكلة المعقدة لكن سوف نوضح كيف يضعنا هذا فى مأزق. لقد تعلمنا من ميكانيكا الكم أن الجرافيتونات تُعتبر جسيمات بالإضافة إلى أنها أيضًا موجات. والجسيم حسب تعريفه هو جُسيم نقطى. والجرافيتون النقطى يتجاذب أقوى كلما اقتربت منه. ويمكن تخيل المجال الجاذبى له على أنه إشعاع

جرافيتونات أُخرى. ولحصر كل هذه الجرافيتونات دعنا نسمى الجرافيتون الأصلى بالجرافيتون الأم وسنشير إلى الجرافيتونات التى يشعها بالجرافيتونات البنات. ويكون المجال الجاذبى قويًا جدًا بالقرب من الجرافيتون الأم وهذا يعنى أن الجرافيتونات البنات لها طاقة وكمية حركة ضخمة وهذا ينبع من علاقة عدم اليقين: الجرافيتونات البنات يُلاحظن خلال مسافة صغيرة جدًا Δ س من الجرافيتون الأم وبالتالى فإن كمية الحركة ليست محددة بمقدار كبير Δp حيث يكون $\Delta p \times \Delta x \geq h/4\pi$. والمشكلة هنا أن الجرافيتونات تستجيب أيضًا لكمية الحركة. فالجرافيتونات البنات سوف يقمن بإشعاع جرافيتونات أُخرى وكل هذه العمليات ستتباعد وبالتالى لن تستطيع حصر كل التأثيرات الخاصة بهذه الجرافيتونات.

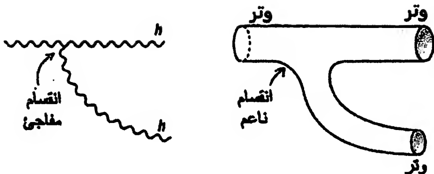
وفى الحقيقة هناك شيء مشابه يحدث بالقرب من الإلكترونات. إذا تعمقت داخل مجال كهربائى قريبًا من الإلكترون فسوف تستثير الإلكترون لإشعاع فوتونات ذات كمية حركة عالية. وهذا يبدو طبيًا حيث إننا نعلم أن الفوتونات لا تشع فوتونات أُخرى. والمشكلة أنها يمكنها الانقسام إلى إلكترونات ومضاد الإلكترونات التى بدورها ستشع فوتونات أُخرى. يا لها من فوضى! ولكن الشيء الباهر هنا أنه فى حالة الإلكترونات والفوتونات يمكنك بالفعل حصر كل هذا التعدد من الجسيمات المولدة بعضها من البعض. وهنا نتحدث عن الإلكترون المكسى لوصف الإلكترون والسحابة من ذُريته. والرمز العلمى لهذه الذرية هو جُسيمات تقديرية. والطريقة الرياضية لحصر الكل هى إعادة الاستنظام وتُمثل روح إعادة الاستنظام أن الإلكترون يمكن أن تكون له شحنة وكتلة لا نهائية لكن بمجرد أن يُكسى فإن شحنته وكتلته تصبحان نهائيتين.



يسارًا: ينتج إلكترون (e^-) جسيمات تقديرية: فوتون γ، بوزيترون (e^+) وكثيرًا من الإلكترونات. ومجموعة الجسيمات تكون بطيئة بما يتفق رياضيًا مع إعادة الاستنظام. يمينًا: ينتج جرافيتون h كثيرًا من الجرافيتونات التقديرية بما يتفق مع عدم إعادة الاستنظام.

المشكلة بالنسبة للجرافيتونات أنك لا تستطيع إعادة استنظام سحابة الجرافيتونات التقديرية التى تُحيط بها. وبالتالى فإن النسبية العامة - نظرية الجاذبية - يُقال عنها إنها غير قابلة للاستنظام وتبدو كلغز يصعب حله. وتوجد فرصة ضئيلة هى أننا ننظر إلى المشكلة من الجهة الخطأ. وتوجد أيضًا فرصة أخرى ربما أقل ضآلة أنه تُوجد نظرية قريبة من النسبية العامة تُسمى الجاذبية الفائقة قابلة للاستنظام. ولكننى مع معظم نظريىّ الوتر نشعر بالتأكيد أن هناك صعوبة أساسية فى دمج ميكانيكا الكم مع الجاذبية.

لنعد إلى نظرية الوتر. الفرض الأساسى أن الجسيمات ليست نُقطية وعلى العكس فهى تذبذبات وترية. ويُعتبر الوتر رفيعًا جدًا لكن له بعض الطول القصير نحو 10^{-34} م طبقًا للأفكار التقليدية الخاصة بنظرية الوتر. وتستجيب الأوتار لبعضها بطريقة مشابهة للجرافيتونات. ويحق لك أن تقلق بأن كل المشكلة المتعلقة بسحب الجسيمات التقديرية - حقيقةً الأوتار التقديرية - سوف تخرج عن التحكم كما حدث فى حالة الجرافيتونات. ولكن ما يمنع هذه المشكلة من الحدوث هو أن الأوتار ليست نقطية وتظهر المشكلة الكبرى بالنسبة للجاذبية لأن الجسيمات النقطية حسب التعريف صغيرة جدًا جدًا ولهذا ظهر التعبير جُسيم نقطى. والاستعاضة عن الجرافيتونات بالأوتار المتذبذبة تُبسط الطريقة التى تتفاعل مع بعضها البعض. وعندما ينقسم جرافيتون إلى اثنين يمكن تحديد الفترة الزمنية والموقع فى الفراغ حيث تم الانقسام. لكن عندما ينقسم وتر فهذا يماثل تفرع الأنبوبة. وعند نقطة التفرع فإنه لا يوجد أى جدار للأنبوبة مُتصدعًا. والأنبوبة التى تشبه حرف Y تكون ملساء. وما نصل إليه هو أن انقسام الوتر أكثر رقة حتى من انقسام الجسيم. ويقول الفيزيائيون إن تفاعلات الوتر رقيقة بطبيعتها بينما تفاعلات الجسيم صُلبة. وهذه الرقة هى التى تجعل نظرية الوتر أسهل من النسبية العامة فى الانقياد وفى التعامل مع ميكانيكا الكم.



ينقسم الجرافيتون فجأة بينما انقسام الوتر يحدث فى منطقة من الزمكان وبالتالى فهو أكثر نعومة.

الأوتار فى الزمكان

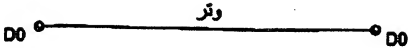
دعونى أذكركم باختصار بمناقشتنا السابقة لوتر البيانو المهتز. فعندما يكون مشدودًا بقوة ونتقر عليه فإنه يهتز بتردد محدد. والتردد هو عدد التذبذبات فى الثانية الواحدة. ولوتر البيانو أيضا نغمات توافقية تندمج مع التردد الرئيسى لتنتج الصوت الخاص المميز للبيانو. وقد قمت بعمل تشبيه لتصرف الإلكترون فى ذرة الهيدروجين: فله أيضا تذبذب مُفضل يناظر أقل مستوى طاقة بالإضافة إلى تذبذبات أخرى تناظر مستويات طاقة أعلى. ربما يُثبطك هذا التشابه قليلاً: لماذا ينبغى للإلكترون فى ذرة الهيدروجين أن يرتبط بالموجات الساكنة لوتر مشدود؟ إنه عبارة عن جُسيم يدور حول النواة الذرية مثل كويكب دقيق يدور حول شمس دقيقة هل هذا صحيح؟ نعم ولا: تُخبرنا ميكانيكا الكم أن صورة الجسيم وصورة الموجة مرتبطتان بعمق وحركة الإلكترون حول البروتون من وجهة نظر ميكانيكا الكم تُمثل بموجات ساكنة.

ويمكن بطريقة مباشرة مقارنة وتر البيانو بالأوتار فى نظرية الوتر. وللتميز بين الأنواع المختلفة من الأوتار دعنى أسمى الأوتار فى نظرية الوتر "الأوتار النسبية". وهذا الرمز يحمل معانى عميقة سنناقشها حالاً وبالأخص أن الأوتار تشمل نظريات النسبية الخاصة والعامة. أريد أن أتكلم الآن عن تركيب نظرية الوتر التى هى أقرب ما تكون لوتر البيانو المشدود. والأوتار النسبية يُسمح لها بالانتهاء على أشياء تُسمى أغشية D. وهذه الأغشية ثقيلة للغاية بفرض إلغاء تأثير تفاعلات الأوتار. وسنناقش هذه الأغشية بتفصيل أكثر فى الفصل القادم ولكنها حتى الآن وسيلة لفهمنا للأوتار. وأبسط نوع من أغشية D هو غشاء D0 . وهو جُسيم نقطى وربما تشعر بالارتباك بسبب ظهور هذه الجسيمات النقطية ثانيةً فى المناقشة. ألم تكن نظرية الوتر مُفترضة للتخلص منها؟ الحقيقة أنها فعلت هذا لفترة لكن فى منتصف التسعينيات عادت الجسيمات النقطية ثانيةً مع كثير من الأشياء الأخرى. وما أريده هو نظرية وتر مُشابهة للأوتار المضبوطة فى البيانو وأغشية D0 مناسبة تمامًا حيث لا يمكننى عدم تقديمها. دعنا نشد وترًا نسبيًا بين غشاءى D0 كما نشد وتر البيانو بين دعامتين. أغشية D0 ليست ملتصقة بأى شىء ولكنها لا تتحرك بسبب وزنها اللانهائى. وسوف أتحدث عن أغشية D0 بالتفصيل فى الفصل القادم. وما أريد أن أتكلم عنه هنا هو الوتر المشدود.

ولا تُوجد أى تذبذبات للأوتار المشدودة ذات الطاقة الصغرى، حسنًا تقريبًا لا تُوجد. لكن توجد دائمًا تذبذبات صغيرة بسبب ميكانيكا الكم وهذا سوف يكون مهمًا حالاً. والطريقة المثلى لفهم الحالة الأرضية هو أن لها طاقة تذبذب صغيرة بما يسمح بميكانيكا الكم. والأوتار النسبية لها حالات مثارة أثناء تذبذبها سواءً كترددها الأساسى أو خلال إحدى النغمات التوافقية. ويمكن لها أن تتذبذب فى الوقت نفسه بترددات مختلفة متعددة مثلما يفعل وتر البيانو. لكن كما أن الإلكترون فى ذرة الهيدروجين لا يمكن له أن يتحرك بطريقة اختيارية فكذلك الوتر النسبى

لا يمكن له أن يهتز بحرية. وينبغي للإلكترون أن يختار من ضمن سلسلة من مستويات الطاقة ذات الفروق المحددة. وبالمثل فإن الوتر ينبغي له أن يختار من ضمن سلسلة من الحالات التذبذبية. والحالات التذبذبية لها طاقات مختلفة. لكن فكما نعلم فإن الطاقة والكتلة مرتبطتان خلال المعادلة $E = mc^2$. وبالتالي فإن حالات التذبذبات المختلفة لها كتل مختلفة.

ربما يكون من المبهج أن أخبرك أن تردد التذبذبات للوتر يناظر طاقته بطريقة بسيطة كما أن المعادلة $E = h\nu$ تربط التردد والطاقة للفوتون. وهناك شيء مشابه يحدث هنا لكن لسوء الحظ ليس بهذه البساطة. تأتى الكتلة الكلية للوتر من مصادر متعددة. أولا تُوجد كتلة السكون للوتر: وهى الكتلة التى يحتويها بمجرد وجوده كوتر مشدود بين غشاء D0 وغشاء آخر. ثانيا توجد طاقة تذبذب فى كل نغمة توافقية وهذا يظهر فى الكتلة لأن الطاقة تكافئ كتلة حسب المعادلة $E = mc^2$. وفى النهاية يُوجد إسهام من أقل تردد مسموحًا به بواسطة عدم اليقين الكمية. ويُسمى هذا الإسهام من التموجات الكمية طاقة نقطة الصفر. وهذا التعبير نقطة الصفر يُذكرنا بأن هذا الإسهام الكمى لا يمكن التخلص منه. ولكن هذا الإسهام من طاقة نقطة الصفر للكتلة يكون سالبًا وهذا يُعتبر غريبًا حقًا. ولفهم كيف أنه غريب لنعتبر الآتى: عند النظر إلى ذبذبة واحدة فقط للوتر فإن طاقة نقطة الصفر تكون موجبة وكذلك النغمات التوافقية الأعلى تؤدى إلى إسهامات أكثر إيجابية لطاقة نقطة الصفر. لكن عند جمع كل هذا بطريقة مناسبة نحصل على رقم سالب. وإذا لم يكن هذا سيئًا بما فيه الكفاية فإنه تُوجد أخبار أسوأ: لقد خدعتكم قليلاً عند قولى إن الإسهام لطاقة نقطة الصفر بالنسبة للكتلة يكون سالبا. لكن يتم جمع كل هذه التأثيرات – كتلة السكون – طاقة تذبذبات – طاقة نقطة الصفر – لتعطينا مربع الكتلة الكلية. وبالتالى إذا كانت طاقة نقطة الصفر أكثر سالبية من الباقى يكون مربع الكتلة سالبًا بما يعنى أن الكتلة تخيلية.









حركات الوتر المشدود بين غشاءى *D0*

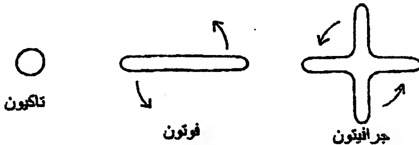
قبل أن ننبذ كل هذا كأشياء بلا معنى دعنى أُضيف أن أجزاء كثيرة من نظرية الوتر قد تم تخصيصها للتخلص من المشكلة الهائلة التى تكلمت عنها فى الفقرة السابقة. ولتحديد هذه المشكلة تحديدا دقيقا فإن الوتر النسبى فى حالة أقل

طاقة كمية يكون له مربع كتلة سالب ويدعى الوتر فى هذه الحالة التاكيون. وهــذه التاكيونات تُماثل ما يواجه أبطال مسلسل ستار تريك فى جميع مشاهد القصة وهــذه أخبار ضارة بالتأكيد. وكما شرحت فإن الوتر المشدود بــين غــشاءى D0 يمكــن بإبعاد هذين الغشاءين بطريقة كافية جعل الإسهام الناتج من شد الــوتر أكبــر مــن الإسهام الناتج من التموجات الكمية. ولكن فى عدم وجود أى أغشية D0 فيمكن أن توجد أيضًا أوتار فبدلاً من انتهائها على أغشية فإنها تنغلق على نفسها. وبالتــالى لا تكون مشدودة مطلقًا ويمكن لها أيضًا أن تتذبذب ولكنها ليــست مــضطرة لــذلك. والشيء الوحيد الذى لا يمكن تجنبه هو وجوذ التموجات الكمية والتى هــى طاقــة نقطة الصفر فهى تميل إلى تحويلها إلى تاكيونات وهــذه أخبــار ســيئة لنظريــة الوتر.والنظرة الحديثة تعتبر التاكيونات حالات غير مستقرة تشبه عدم استقرار قلــم رصاص موضوع على سنه. وإذا كانت لــك المهــارة الــشديدة والإرادة الــصلبة فيمكنك أن تجعله يثبت على هذا الوضع. ولكن أقل قدر من الرياح ســوف يجعلــه ينقلب. وتماثل نظرية الوتر بالتاكيونات حركة الملايــين مــن أقــلام الرصــاص الموزعة خلال الفراغ وكلها فى وضع مستقر حول رءوسها.

دعنى لا أجعل الصورة شديدة السواد فربما توجــد رحمــة إلهيــة لإنقــاذ التاكيونات. دعنا نتفق على أن الحالة الأرضية للوتر هــى تــاكيون بمربــع كتلــة سالب: $m^2 < 0$ وطاقة التذبذبات تجعل m^2 أقل سالبية. وفى الحقيقة فإن أقل قدر من طاقة التذبذب التى تسمح بها ميكانيكا الكم يجعل الكتلة m تساوى بالــضبط صفرًا. وهذا عظيم لأننا نعلم أنه توجد جسيمات بــلا كتلــة فــى الطبيعــة: مثــل الفوتونات والجرافيتونات. ولهذا فلكى تصف الأوتار عالمنا يجب أن توجــد أوتــار بلا كتلة وبدقة أكثر يجب وجود حالات كمية للأوتار المهتزة دون كتلة.

ولكنك سوف تحتاج إلى ست وعشرين بعدًا للزمكان وهناك أسباب كثيرة لوجود ست وعشرين بعدًا ولكن معظمها أسباب رياضية وأخشى ألا أستطيع أن

أقنعكم بها. والسبب الذى أتذكره جيدًا يعتمد على النقاط الآتية: تعلمون أنكم تريدون حالات وترية بلا كتلة وتعلمون كذلك أنه توجد تموجات كمية لنقطة الصفر التى تدفع m^2 لتكون سالبة. وتعلمون أيضًا أنه توجد تذبذبات تدفع m^2 فى الاتجاه الآخر وأقل قيمة للطاقة التذبذبية لا تعتمد على أبعاد الزمكان، ولكن التموجات الكمية لنقطة الصفر تعتمد على الأبعاد. ولنفكر بهذه الطريقة: عندما يهتز أى شىء مثل وتر البيانو فإنه يفعل ذلك فى اتجاه محدد فوتر البيانو يهتز فى اتجاه الضرب نفسه. وفى هذه الحالة يكون التذبذب لأعلى وأسفل وليس من جانب إلى آخر. وبالتالى فإن التذبذبات تأخذ اتجاهًا واحدًا وتُهمل كل الاتجاهات الأُخرى. وعلى العكس فإن التموجات الكمية لنقطة الصفر تسير فى كل اتجاه ممكن. ولهذا فإن كل بعد إضافى تُقدمه يُعطى التموجات الكمية أبعادًا أُخرى تتحرك فيها. وبالتالى فكلما زادت الاتجاهات زادت التموجات الكمية لنقطة الصفر وبالتالى زادت الإسهامات السالبة إلى m^2. ولهذا يجب أن نسأل كيف يتم التوازن بين التذبذبات والتموجات الكمية لنقطة الصفر؟ وهذا يعتمد على الحسابات. وقد اتضح أن أقل كمية من التذبذبات تلغى التموجـــات الكمية ذات الـــ ٢٦ بعدًا مؤدية إلى حـــالات وترية دون كتلة كما نرغب. ولننظر إلى الجانب المضيء فربما كنا قد احتجنا ٢٦ بعدًا ونصف البعد.



صورة كارتونية للحالات الكمية للوتر التى تجعله يتصرف كتـــاكيون أو فوتون أو جرافيتون.

وإذا كنت لا تزال مُشوشًا بين تذبذبات الوتر والتموجات الكمية لنقطــة الــصفر فلا تكن مُحبطًا فهما متشابهان حقيقةً. والاختلاف الوحيد هــو أن التذبــذبات اختياريــة ولكن التموجات الكمية لنقطة الصفر ليست كذلك. فتموجات نقطة الصفر هى أقل قيمــة للتذبذبات المطلوبة بواسطة مبدأ عدم اليقين. والتذبذبات الإضافية فوق هــذا يمكــن أن تكون تذبذبات كمية. ومما يساعد على التخيل هو اعتبار التذبذبات هى الأشــياء التــى تُعطى الوتر شكلاً مميزًا: ربما يكون دائريًا، مفترق طرق، ملفوفًــا. وهــذه الأشــكال المختلفة يُفترض أنها تناظر جُسيمات مختلفة. ولكن التحدث عن شــكل الــوتر المهتــز يكون غير دقيق. لأن كل التذبذبات هى تذبذبات كمية. ولكــن الأفــضل أن نقــول إن الطرق الكمية المختلفة لتذبذبات الوتر تُناظر جُسيمات مختلفة. فإن الأشكال هى صــور عقلية تساعدنا على تخيل بعض الخواص لهذه التذبذبات الكمية.

اختصارًا فإن لدينا أخبارًا جيدةً، أخبارًا سيئةً، وأخبارًا أسوأ. فللأوتار نغمات توافقية ويمكن أن تتصرف مثل الفوتون أو الجرافيتون وهذه هى الأخبــار الجيــدة. وهى تعمل فقط فى ٢٦ بعدًا وهذه هى الأخبار السيئة وتوجد أيضًا نغمــة تذبذبيــة للوتر التى تجعله ذا كتلة تخيلية أو ما يسمى بالتاكيون. وهى ترمز إلى عدم ثبــات النظرية كلها ولا يوجد أسوأ من هذا.

ويُمكن لنظرية الوتر الفائق أن تُعالج مشكلة التاكيون وتُقلل عدد الأبعاد مــن ٢٦ إلى ١٠ بالإضافة إلى أنها تُنتج نغمات تذبذبية تُمكن الأوتار من أن تتــصرف كالإلكترونات. بافتراض أنه توجد نظرية الوتر الفائق المضاعفة التى تُمكــن مــن تخفيض عدد الأبعاد إلى ٤ فسوف يكون هذا جيدًا. وتوجد حقًا صيغة لهذه النظرية ذات الاسم العلمى هى نظرية الوتر ذات التماثل الفائق المحلى الممتد. تستطيع هذه النظرية أن تخفض عدد الأبعاد إلى ٤ . لكن لسوء الحظ فإن هذه الأبعاد تأتى فــى أزواج. لهذا يمكنك أن تحصل على أربعة أبعاد مكانية دون بعد زمنــى أو بعــدين مكانيين وبعدين زمانيين وهذا ليس جيدًا. فنحن نحتاج إلى ثلاثة أبعاد مكانية وواحد

زمنى. ومن ضمن الأبعاد العشرة التى تتطلبها نظرية الوتر الفائق هناك تسعة أبعاد مكانية وبعد واحد زمنى. ولربط نظرية الوتر الفائق بالعالم ينبغى علينا بأى طريقة التخلص من ستة من الأبعاد التسعة المكانية.

وهناك الكثير الذى أود أن أخبرك به حول الأوتار الفائقة. لكن على معظمه أن ينتظر حتى الفصول التالية. دعنى أركز هنا على علاج مشكلة التاكيون. لا يتموج الوتر الفائق فقط فى المكان والزمان لكن أيضًا فى طرق أكثر تجريدًا. وهذه الأنواع الأخرى من التموجات تسير منتصف الطريق نحو حل مشكلة التاكيون لكن ليس كل الطريق فلا تزال توجد نغمة تذبذبية بمربع كتلة سالب. وأصل القصة أنه إذا بدأت بنغمات تذبذب تُمثل الفوتونات، الإلكترونات والجسيمات الأخرى التى نحتاجها ومهما أجريت من تصادمات فلن تحصل إطلاقًا على تاكيون. وهذا يُشعرنا أن النظرية كلها لا تزال تتزن على طرف سكين لكن لها نوع خاص من التماثل الذى يُمكنها أن تظل متزنة. وهذا التماثل يُسمى التماثل الفائق. ويأمل الفيزيائيون فى إيجاد دليل على وجود التماثل الفائق خلال السنوات القليلة القادمة. وإذا وُجد هذا الدليل فإن كثيرًا منا سيأخذ هذا كدليل على صحة نظرية الوتر الفائق وسوف أناقش هذا أكثر فى الفصل السابع.

مفهوم الزمكان من خلال الأوتار

لقد تحدثت كثيرًا عن تذبذبات الأوتار وتموجاتها فى الزمكان. دعنا نأخذ خطوة للخلف ونسأل ما المكان بالضبط؟ وما الزمان بالضبط؟ هناك وجهة نظر أن الفراغ يأخذ معناه فقط من خلال وجود الأشياء به وما يحدده المكان هو المسافة بين الأشياء. وهناك رؤية مشابهة للزمان فإنه أيضًا بلا معنى بمفرده ولكنه فقط يصف أحداثًا متتابعة. ولجعل هذا أكثر دقة نفترض وجود زوج من الجسيمات أ،

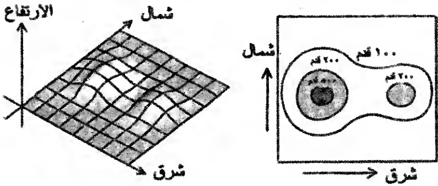
ب والطريقة التقليدية هى أن كلاً منهما يتحرك على مسار خلال الزمكان وعندما يتلاقى هذان المساران فإنهما يصطدمان. ربما لا يوجد خطأ فى هذا التفكير. لكن دعنا نأخذ الرؤية البديلة أن المكان والزمان ليس لهما معنى فى غياب الأشياء فماذا يمكن أن يعنى هذا؟. حسنًا لنصف مسار الجسيم أ، يمكننا أن نحدد موقعه كدالة فى الزمان وبالمثل بالنسبة للجسيم ب. وإذا فعلنا هذا فربما يمكننا أن نتجاهل الزمان والمكان عدا أنهما يُمثلان بالموقع المتغير للجسيمات. ويمكننا أيضًا أن نعرف إذا تصادم الجسيمان فإنه يجب أن يكون لهما الموقع نفسه والزمان نفسه عندما يصطدمان.

إذا كان كل هذا يبدو مجردًا بشدة تخيل الجسيمات كعربات سباق مجهزة بأجهزة GPS وساعات. دعنا نفترض أن أجهزة GPS تقوم بالتسجيل لأماكن العربات كل ثانية. ما الذى يمكن أن نتعلمه من ملاحظة القراءات لأجهزة GPS؟ دعنا نفترض أن كل عربات السباق تتحرك على مضمار السباق نفسه. بملاحظة قياسات GPS فإن أول شيء نلاحظه أن العربات تكرر العودة للمكان نفسه بعد تحركها لمسافة محدودة وهى المسافة حول المضمار. وبالتالى فإنك يمكن أن تقول إن العربات تتحرك على مسار دائرى. وبالتالى يمكن أن نلاحظ أن العربات تتسارع وتتباطأ كثيرًا. ولسوف تكتشف أن مضمار السباق ليس دائريًا مطلقًا بل على العكس فيه بعض المنحنيات التى عندها ينبغى لعربات السباق أن تتباطأ وأجزاء مستقيمة حيث يمكنها أن تسرع. ويمكنك أيضًا أن تلاحظ أن كل العربات التى قمت بعمل تسجيلات لها تتحرك حول المضمار فى الاتجاه نفسه. وبالتالى سيمكنك أن تستنتج أنه توجد قاعدة فى حلبة السباق ينبغى على كل المتسابقين أن يتحركوا بالطريقة نفسها. وفى النهاية يمكنك أن تلاحظ أيضًا أن العربات يمكن أن تقترب كثيرًا من بعضها لكن نادرًا ما تتصادم. ويمكنك أن تستنتج على نحو معقول أن هدف سباق العربات ليس هو الاصطدام.

والنتيجة أنه بملاحظة تسجيلات GPS فقط لعدد من عربات السباق وإجـراء بعض الأعمال الاستنتاجية يمكنك أن تكتشف كثيرًا حول مضمار السباق وقواعـد القيادة عليه. وربما يبدو هذا طريقة عقيمة لاكتشاف أشياء يمكنك اكتشافها بسهولة بملاحظة سباق حقيقى. لكن فى الحقيقة فإن ملاحظة سباق نشاط معقد للغاية. فتعنى الملاحظة أن الفوتونات ترتد من العربات وتعود إلى عينيك وهذا يتطلب كثيرًا من الفيزياء. إنه من الأسهل أن نقول إن تسجيلات GPS عن أماكن وجود كل العربات ثانية بثانية تحتوى كل المعلومات الضرورية عن الذى حدث فى السباق، ووجود هذه التسجيلات فى متناولك لا يضطرك للاستفسار عن أشياء معقدة مثل المشاهدين فى المنصة والفوتونات المتحركة ذهابًا وإيابًا. ولن تُضطر إلى السؤال عما إذا كان هناك أى شيء فى العالم خلف مضمار السباق. ولن تضطر حتى لافتراض وجود مضمار السباق. بل على العكس يمكنك استنتاج وجوده وبعض خصائصه بدراسة التسجيلات عن كيفية حركة العربات.

وكثيرًا من نظرية الوتر يتم بهذا الشكل. بمعرفة طريقة حركة الأوتار وتفاعلاتها يمكنك استنتاج خصائص المكان والزمان. وهذه الطريقة تُسمى نظرية الوتر ذات صفيحة العالم. وصفيحة العالم هى طريقة لتسجيل كيف يتحرك الوتر. وهى تماثل تسجيلات GPS ثانية بثانية لأماكن وجود العربات على مضمار السباق. ولكنها أعقد قليلاً لسببين أولاً يمكن للوتر أن يكون طويلاً وملتويًا ولكى تقول أين يوجد ينبغى عليك أن تحدد مكان كل جزء منه. ثانيًا فكما ذكرنا سابقًا فإن الأوتار تعيش فى ٢٦ بعدًا أو على الأقل ١٠ أبعاد. وهذه الأبعاد يمكنها أن تكون منحنية أو ملتفة بطريقة معقدة. وغالبًا ما يكون من المستحيل النظر إلى هندسة الزمكان بالطريقة نفسها التى يمكنك بها ملاحظة العربات فى مضمار السباق. والأسئلة ذات المعنى هى التى تتعلق بكيفية تحرك الأوتار وتفاعلها. ولكن الزمكان بذاته فى طريقة صفيحة العالم هو فقط ما تشعر به الأوتار وليس منصة ثابتة لها.

وصفيحة العالم للوتر سطح لو استطعت أن تقطعه فسوف تحصل على منحنى وهذا المنحنى يُفترض أنه الوتر. وقطع هذا السطح بطرق مختلفة يماثل تسجيلات GPS لعربة فى أزمنة مختلفة. ولكى تعرف كيف يتحرك الوتر خلال الزمكان فإنه ينبغى عليك أن تخصص نقطة فى الفراغ ولحظة فى الزمن لكل نقطة على سطح العالم. فكر فى هذا كإلحاق باقة من المعلومات لجميع نقاط صفيحة العالم. وعندما تقطع صفيحة العالم فإن المنحنى الذى تحصل عليه له تلك المعلومات ولذا فهو يعرف ما شكله المفترض داخل الفضاء. وصفيحة العالم إجمالاً هو السطح الذى يمسحه الوتر عندما يتحرك فى الزمكان.



يسارًا: تلين مفصولين بهضبة على شكل سرج الحصان.يمينًا: خريطة توبولوجية للسهول حيث تظهر الخطوط التى تمثل الأماكن ذات الارتفاع المتساوى.

ويمكن أن تقدر ما أعنيه بتصنيف سطح العالم بالتفكير فى خريطة طبوغرافية. فعلى الخريطة الطبوغرافية توجد خطوط ارتفاع وكل خط عليه رقم يمثل الارتفاع. والآن فإن هذه الخريطة الطبوغرافية ذاتها قطعة مستوية من الورق ولكنها تمثل مناطق من سطح الأرض يمكن أن تكون مرتفعة.

وإحدى الطرق لتخيل صفيحة العالم الخاصة بالوتر أنها تشبه خريطة طبوغرافية تُظهر كيف يُفترض للوتر أن يتحرك فى الزمكان. ولكن هناك وجهة نظر أُخرى هى أن صفيحة العالم للوتر تُمثل كل شيء بينما الزمكان ليس إلا تجميع البيانات التى تضعها على صفيحة العالم. وفى الخريطة الطبوغرافية المعتادة فإن البيانات تُمثل الارتفاعات ولهذا فإن تجميع كل البيانات يمثل تمامًا مدى الارتفاعات الممكنة على سطح الأرض: تقريبًا من ٤٠٠ إلى ٨٨٠٠ متر إذا استبعدت قاعات المحيطات. وفى نظرية الوتر ذات صفيحة العالم فإن كل بيان يمثل الموضع فى ٢٦ بعدًا (أو ١٠ فى حالة الأوتار الفائقة) وبعض هذه الأبعاد الـ ٢٦ يمكن أن تلتف وتُعيد اتصالها ببعضها مثلما يفعل مضمار السباق. والنقطة هنا أن مفهوم الزمكان ينشأ من كيفية إعطاء صفيحة العالم بياناتها كما أن الارتفاع ينشأ من الطريقة التى تضع بها البيانات على الخريطة الطبوغرافية.

دعنا نُلخص ونصل إلى نقطة أساسية فى نظرية الوتر ذات صفيحة العالم. غالبًا ما نعتقد أن الأوتار تتذبذب فى الزمكان ولكن المكان والزمان ليسا بالضرورة مفاهيم مطلقة. بل من الأفضل ألا يكونا كذلك لأنه فى هذه الحالة يمكن لبعض المبادئ الديناميكية أن تتحكم فى شكل الزمكان. وهذا ما يحدث فى نظرية الوتر. وفى حالة نظرية الوتر ذات صفيحة العالم فإن الزمكان فقط يُمثل كشف البيانات المسموح بها لوصف كيف يمكن للوتر أن يتحرك. وفى معالجة كمية لهذه البيانات فإنها تتموج قليلاً. ويظهر أنه يمكنك أن تقتفى آثار هذه التموجات الكمية فقط فى حالة خضوع الزمكان لمعادلات النسبية العامة. والنسبية العامة هى النظرية الحديثة للجاذبية وبالتالى فإن ميكانيكا الكم بالإضافة إلى نظرية الوتر ذات صفيحة العالم تتضمنان الجاذبية وهذا شيء بديع.

ولشرح كيف يمكن لك أن تقتفى آثار التموجات الكمية للزمكان على صفيحة العالم للوتر فإن هذا سوف يأخذنا إلى منطقة تقنية عالية. وتوجد نقطة من مثال

عربات السباق والتي يمكن أن تُساعد في التخيل. فلو تذكرتم فقد افترضت أنه يمكنكم التخمين بأن مضمار السباق به طرق مستقيمة ومنحنيات بملاحظة أن عربات السباق تبطئ عند عبور أجزاء من المضمار ثم تُسرع في الأجزاء الأُخرى. لكن هناك شيئا لا يمكن أن يوجد بمضمار السباق ألا وهو الأركان حيث ينبغي عليك الدوران فجأة. وهذا بسبب أن العربات ينبغي عليها التوقف عند الأركان وهذا لن يكون مسليًا وعلى العكس من روح سباق العربات. وبالمثل فإن أحد الأشياء التي ترفضها معادلات النسبية العامة كليةً تقريبًا هي الأركان الحادة في الزمكان والتي غالبًا ما تُدعى المفردات. أنا أقول تقريبًا لأن هذه المفردات مسموحٌ بها خلف أفق الثقب الأسود. ويمكن فهم غياب المفردات في الزمكان كشيء مشابه لغياب الأركان في مضمار السباق. ولا يُمكن للأوتار أن تمر خلال المفردات أكثر مما يمكن لعربات السباق أن تدور مسرعةً حول ركن دون توقف. لكن يوجد بعض استثناءات. ويوجد في نظرية الوتر موضوع ضخم وساحر وهو فهم أنواع المفردات المسموح بها. وغالبًا ما تكون تلك المفردات غير مفهومة في النسبية العامة. ولهذا فإن نظرية الوتر تسمح بالفعل بدرجات أغنى من هندسيات الزمكان أكثر من النسبية العامة. ويتضح أن نظرية الوتر ذات الهندسيات الإضافية ترتبط في بعض الحالات بالأغشية والتي سنتعرض لها في الفصل القادم.

الفصل الخامس

الأغشيــة

فى عام ١٩٨٩ بعد قضائى للسنة الأولى فى المدارس العليا ذهبت إلى معسكر للفيزياء. وقد استمعنا إلى محاضرة عن نظرية الوتر كأحد الأشياء التى قمنا بها. وعند انقضاء نصف المحاضرة تقريبا سأل أحد الطلبة سؤالاً ذكيًا فقد قال لماذا نتوقف عند الأوتار ولا نعمل مع الصفائح أو الأغشية أو مع أشياء ثلاثية الأبعاد من مواد كمية؟ وقد أجاب المحاضر بأن الأوتار تبدو صعبة وفعالة بما فيه الكفاية ويبدو أن لها ميزات خاصة لا يمتلكها كل من الأغشية والأشياء ثلاثية الأبعاد.

وبمرور نحو ست سنوات وصولاً إلى سنة ١٩٩٥ : كان كل باحثى نظرية الوتر فى حالة إثارة بسبب ظهور ما سُمى بأغشية D وهذه الأغشية هى بالضبط ما كان يسأل عنه الطالب الذكى سنة ١٩٨٩. وهى أشياء فى نظرية الوتر يمكن أن يكون لها أى عدد من الأبعاد. ويتحدث هذا الفصل عن أغشية D والبعض من خصائصها المذهلة. وسوف أبدأ بالتحدث باختصار عن ثورة الوتر الفائق الثانية التى كانت فرصة مناسبة للأفكار الجديدة التى اكتسحت هذا المجال فى منتصف التسعينيات. وسوف أخبركم بالضبط ما هو غشاء D. وسوف أناقش مفهوم التماثل وكيف يرتبط مع أغشية D. وسوف أناقش تاليا كيف ترتبط أغشية D بالثقوب السوداء. وسوف أتطرق فى النهاية إلى بعض النقاش عن نظرية M وهى عبارة عن نظرية ذات الأحد عشر بعدًا التى هى من متطلبات نظرية الوتر ولكنها ليست بالكامل جزءًا منها.

ثورة الوتر الفائق الثانية

ما قد قمت بتوضيحه فى الفصل الأخير حول منظور نظرية الوتر هو مـا كان يفهمه نظريو الوتر فى عام ١٩٨٩ وقد كانوا على علم بخطـورة التاكيونـات. والخصائص الرائعة للوتر الفائق والعلاقة بين الأوتار والزمكان. وهناك شيء آخر كانوا يفهمونه نادرا ما ذكرته وهو الدمج: وهو عملية تدوير الأبعاد الستة الإضافية فى نظرية الوتر الفائق حتى تتبقى مع ثلاثة أبعاد مكانية وبعد واحد زمانى. وكـان هذا يبدو جيدًا لأنه يصبح لدينا كل مقومات فيزياء أساسية. فقد كانت توجد الجاذبية وتوجد الفوتونات. والإلكترونات والجسيمات الأخـرى كانـت موجـودة أيـضا. والتفاعلات الموجودة بينها كانت كما أردنا. وقد بدا أن الدمج الملائم سوف يعطينـا القائمة الصحيحة من الجسيمات وهذه القائمة تمتد أكثر مما ذكرتُ حتى الآن. ولكن نظريى الوتر لم يستطيعوا إغلاق الصفحة بإنتاج نوع ملائم من الدمج الذى يـؤدى تمامًا إلى الفيزياء التى نلاحظها فى العالم الحقيقى.

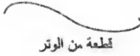
وبالنظر إلى هذه الفترة الزمنية كانت توجد أيضًا مـشكلة أخـرى. كانـت هناك أوتار وأوتار وأوتار طوال اليوم وكان فهمنا لصفيحة العـالم للأوتـار فهمًـا عميقًا. ولكن هذا الفهم العميق ربما جعلهم يغفلون مؤقتا عن الإمكانيـات الأخـرى التى فى النهاية قد بُحثت فى ثورة الوتر الفائق الثانية. ومن الصعوبة بالنـسبة لـى اتباع تاريخ هذه الفترة بدقة كاملة حيث إننى دخلت هذا المجال بعد الثـورة الثانيـة بقليل. ولكن بعض الإيحاءات بدأت تتجمع لتخبرنا أن الأوتار ليست كـل القـصة. وقبل بدء المناقشة التفصيلية للأغشية يبدو لى أنه من المهم أن ألخص بعض هـذه الإيحاءات وأن أُعطى فكرة عامة عن محتوى ثورة الوتر الفائق الثانية.

وأحد هذه الإيحاءات كان أن التفاعلات بين الأوتار تصبح أقل تحكمًا بزيــادة الأحداث المتصلة والمتفرعة منها. وقد تم اقتراح أنه توجد أنواع من الأشياء يجــب أن تضاف لإمكانية التعامل مع نظرية الوتر عندما تصبح التفاعلات قوية. وهنــاك إيحاء آخر أتى من نظريات الجاذبية الفائقة وهو نهاية نظرية الــوتر الفــائق عنــد الطاقة المنخفضة. وما أعنيه بالطاقة المنخفضة هو أنك تلقى بكل التذبــذبات عــدا التذبذبات ذات أقل طاقة للوتر الفائق. وما تبقيه هو الجرافيتون وبعض الجــسيمات الأخرى ذات التفاعلات المفهومة جيدا ما دامت أنها ليست ذات طاقة عاليــة. وقــد تمت ملاحظة أن نظريات الجاذبية الفائقة بها بعض المتماثلات الرائعة التى لم تكن واضحة فى وصف نظرية الوتر عن طريق صفيحة العالم. وقد بدا أن هذا يعطــى انطباعًا أن الوصف عن طريق صفيحة العالم لم يكن مكتملا. وجاء أكبر إيحاء عن طريق تكوين الأغشية ويعتبر الغشاء كوتر لكن يمكن أن يكون لــه أى عــدد مــن الأبعاد المكانية. فيعتبر الوتر غشاء1 والجسيم النقطى غشاء 0 والغشاء الذى عنــد أى لحظة زمنية يكون سطحًا يمثل غشاء 2 ويوجد أيضًا غشاء 3 وغشاء 4 وغشاء 5 (نوعان) وغشاء 6 وغشاء 7 وغشاء 8 وغشاء 9. وبهذه الأعداد المختلفــة مــن الأغشية الموجودة فى نظرية الوتر بدا أنه من غير الممكن فهم كل الأشياء بدلالــة الأوتار فقط. وجاء آخر إيحاء من نظرية الجاذبية الفائقة ذات ١١ بعدًا. وقــد تــم إنشاء هذه النظرية اعتمادًا فقط على فكرتين: التماثل الفائق والنسبية العامــة. ولهــا بعض الارتباطات بنظريات الجاذبية الفائقة التى تنتج من نظريــة الــوتر. وهــذه الارتباطات كانت مفهومة جيدا قبل ثورة الوتر الفائق الثانية. لكن لم يكن واضــحًا كيف أو هل كانت مرتبطة بنظرية الوتر ذات صفيحة العالم. وأسوأ شىء هنا أنهــا لم تتضمن ميكانيكا الكم. ولهذا كان ينظر إليها نظريو الأوتار بنظرة شــك. لأنهــم اعتادوا التفكير أن ميكانيكا الكم والجاذبية كانتا مرتبطتين. ولهــذا كانــت الجاذبيــة الفائقة ذات أحد عشر بعدًا نظرية غامضة بالنسبة لنظرية الأوتار: فقد كانت قريبــة لما كانوا يهتمون به لكن لم يكن لها معنى بالكامل.

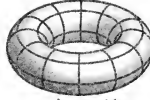
غشاء - 0



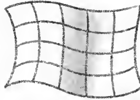
وتر مغلق



قطعة من الوتر

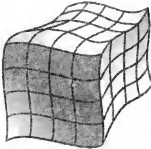


غشاء - 2 مغلق



قطعة من غشاء - 2

غشاء - 3 مغلق من الصعب رسمه



قطعة من غشاء - 3

غشاء – 0، أوتار، غشاء – 2، غشاء – 3، يمكن للوتر أن ينغلق على نفسه ليكون دائرة مغلقة، ويمكن للغشاء – 2 أن ينغلق على نفسه ليكون سطحًا دون حدود، ويمكن للغشاء – 3 أن يفعل شيئًا مشابهًا لكن من الصعب رسمه.

وقد تغير هذا المجال بصورة جذرية خلال بعض السنوات القليلة فى منتصف التسعينيات حيث إن الإيحاءات كونت نموذجًا متماسكًا. وكانت الأوتار لا تزال مهمة لكن اتضح أن الأغشية ذات الأبعاد المختلفة كانت أيضا أساسية.

وفى بعض الحالات فإنه قد تم وضع الأغشية على الدرجة نفسها مثل الأوتار. وفى بعض الحالات الأخرى تم وصف الأغشية كثقوب سوداء لها درجة حرارة صفر. وقد انضمت الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا بطريقة جميلة إلى هذه الأفكار. واتضح أنه ينبغى أن تأخذ اسمًا جديدًا: نظرية م. وتعنى نظرية M بالضبط أى نظرية كمية متناسقة ولها عند الطاقات الصغرى جاذبية فائقة ذات أحد عشر بعدًا. ومن المحزن أن ثورة الوتر الفائق الثانية لم تستطع أن تُعطى وصفا كاملاً عما هى نظرية م. ولكن ما أصبح واضحًا هو أنه بهذه الإمكانيات التى تمدنا بها الأغشية يمكن للفرد فهم نظرية الوتر بطريقة جديدة. كان من المفاجأة إدراك أنه فى حالة كون تفاعلات الوتر قوية جدًا فإنه توجد أشياء جديدة (غالبا هى الأغشية) تعطينا تفسيرًا أسهل للديناميكا.

من الواضح أنى قدمت لكم مسحًا مختصرًا لأفكار ثورة الوتر الفائق الثانية والباقى من هذا الفصل ومعظم الفصل السادس سيخصص لتطوير بعض هذه الأفكار بصورة أشمل. وأنسب مكان للبدء هو أغشية D.

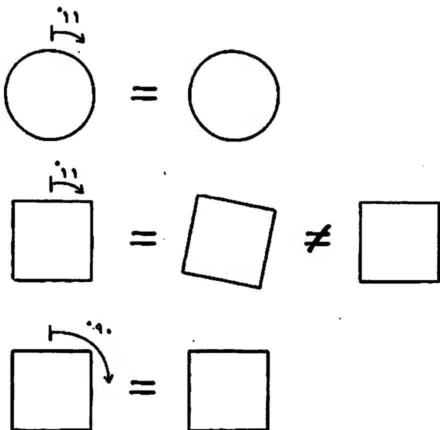
أغشية D والتماثلات

أغشية D هى نوع خاص من الأغشية تُعرف بأنها المواضع فى الفراغ حيث تنتهى الأوتار. وقد استغرقنا وقتًا طويلاً لندرك أن هذه الفكرة البسيطة يمكن تطويرها إلى فهم عميق عن كيفية تحرك وتفاعل أغشية D. ولأغشية D كتلة محدودة ويمكن حسابها اعتمادًا على فكرة أن الأوتار تنتهى على أغشية D. وهذه الكتلة تصبح أكبر فأكبر عندما تتفاعل الأوتار أضعف فأضعف. والافتراض العام فى نظرية الوتر ذات صفيحة العالم أن تفاعلات الأوتار ضعيفة جدًا وبالتالى فإن

أغشية D تكون ثقيلة جدًا وبالتالى يصعب تحريكها ولهذا يصعب تقدير دورها كأجسام ديناميكية فى نظرية الوتر. وأعتقد أن سيطرة الفرض الخاص بضعف تفاعلات الوتر والذى ظهر قبل ثورة الوتر الفائق الثانية كان هو السبب فى مرور فترة زمنية لاعتبار أغشية D أشياء ديناميكية مفردة.

ولقد قدمت فى الفصل السابق أغشية D0 وتُعتبر جسيمات نُقطية بينما تمثل أغشية D1 أوتارًا وهى تمتد فى بعد واحد مكانى ويمكنها أن تنغلق على أنفسها لتكوّن حلقات. ويمكن لها أن تتحرك بمختلف الطرق تماما مثل الأوتار. أى أنها يمكنها أن تتذبذب ولها أيضا تموجات كمية. ويمتد غشاء Dp فى p من الأبعاد المكانية وتوجد أغشية Dp فى نظرية الوتر ذات الستة والعشرين بعدًا وأيضًا فى نظرية الوتر الفائق ذات الأبعاد العشرة. وكما أوضحت فى الفصل الرابع فإن لنظرية الوتر ذات الستة والعشرين بعدًا مشكلة مرعبة: ألا وهى تاكيون الوتر الذى يمثل نوعا من عدم الثبات. ويوجد عدم ثبات مشابه بالنسبة لأغشية D فى نظرية الوتر ذات الستة والعشرين بعدًا لكن ليست فى نظرية الوتر الفائق ذات الأبعاد العشرة. وسوف أتحدث فى المتبقى من هذا الكتاب فى الأغلب عن نظرية الوتر الفائق.

ويمكن فهم الكثير عن أغشية D عن طريق فهم تماثلاتها، وقد تحدثت عن كلمة تماثل بحرية حتى الآن. لكن دعونى الآن أشرح ماذا يعنى الفيزيائيون بهذه الكلمة؟ تعتبر الدائرة شكلا متماثلا وكذلك المربع ولكن الدائرة أكثر تماثلا من المربع وسوف أتحقق هنا من هذه المقارنة.



إدارة دائرة بأى زاوية تجعلها تبدو كما هى، إدارة مربـــع بزاويـــة ٩٠°
تتركه كما هو، ولكن إدارته بأى زاوية أخرى تغير شكله.

يظل المربع كما هو إذا أدرته ٩٠ درجة وتكون الدائرة هى نفسها بـــصرف النظر عن الزاوية التى تديرها بها وبالتالى فإنه توجد طرق كثيرة لرؤيـــة الـــدائرة كما هى. وهذا هو كل ما يُعنى به التماثل فعندما يبدو شىء ما كما هو عند النظـــر إليه من زوايا مختلفة أو بطرق مختلفة فإن له خاصية التماثل.

ويتعامل الفيزيائيون والرياضيون بطرق أكثر تجريدًا لوصف التماثل. والمفهوم الأساسى يُسمى زمرة التماثل. فعندما تدير دائرة ٩٠ درجة إلى اليمين فإن هذا يمثل عنصرًا فى الزمرة وهذا العنصر هو الدوران ٩٠ درجة. ويفهم كل واحد فكرة الدوران لليمين فالدوران لليمين عادة يعنى الدوران ٩٠ درجة إلى جهة اليمين ويفهم كذلك الدوران لليسار كدوران عكسى للدوران لليمين. ومن الواضح أن الدوران لليمين والدوران لليسار يلغى كل منهما الآخر مثل ١، -١ يعطيان صفرًا عند جمعهما.

وهناك شيء آخر تعلمونه حول الدوران لليمين والدوران لليسار والذى يعنى دوران ٩٠ درجة فإن ثلاثة دورانات إلى اليمين تكافئ دورانًا إلى اليسار. وبعد أربعة دورانات لليمين فإنك تتحرك فى الاتجاه نفسه الذى كنت فيه. وهذا مختلف تماما عن جمع الأعداد وطرحها. تخيل الدوران لليمين كرقم ١ والدوران لليسار كرقم - ١، فدورانان لليمين يكونان ١+١ = ٢ ودورانان لليمين ودوران واحد إلى اليسار تصبح ١+١ -١ = ١ وهذا يمثل دورانًا واحدًا إلى اليمين. وحتى الآن يبدو هذا جيدًا. ولكن أربعة دورانات لليمين تمثل عدم الدوران على الإطلاق وهذا يعنى أن ١+١ +١+١= صفرا وهذا ليس حسنًا. وهذا يوضح الفرق بين حساب الدورانات لليمين واليسار والحساب العادى. ومن الناحية الرياضية فكل ما تبتغى معرفته عن الزمرة هو كيفية جمع عناصرها. وأيضا تبتغى معرفة كيف يمكن إيجاد معكوس العنصر داخل الزمرة فمعكوس الدوران لليمين هو دوران لليسار وما يفعله عنصر فى الزمرة يلغيه معكوسه.

هناك تشابه واضح بين هذه المناقشة وتلك التى تمت فى الفصل الرابع عن مفهوم الزمكان من خلال الأوتار. ففى المقطع السابق بدأنا فى التفكير فى صفيحة العالم للوتر كسطح مجرد ثم حددنا له كيف يتحرك فى الزمكان. بينما نفكر هنا فى الزمرة كتجميعه مجردة من العناصر. ثم نقرر كيف لعناصر هذه الزمرة أن تؤثر فى أشياء معينة مثل دائرة أو مربع أو عربة مسافرة.

وأنا أدعى أن زمرة التماثل للمربع (بطريقة أدق زمرة التماثل الدورانى للمربع) تكافئ الزمرة التى تصف الدورانات لليمين واليسار. والدوران إلى اليمين يعنى الدوران بزاوية ٩٠ درجة. وعندما تكون سائق عربة فإن معنى الدوران لليمين أنك تمر حول ركن: أى أنك تقوم بالدوران وفى الوقت نفسه تتحرك للأمام. لكن كما أخبرتك فإنك تحاول الحفاظ على الاتجاه الذى تواجهه وليس التقدم للأمام. وإذا كان هذا هو كل ما نفكر فيه فإن الدوران بزاوية ٩٠ درجة هو مجرد دوران كما لو كنا توقفنا عند منتصف التقاطع وأدرنا العربة بواسطة سحرية ثم بدأنا الحركة ثانيةً. ويماثل الدوران بزاوية ٩٠ درجة هنا التماثلات الدائرية للمربع. وتعتبر الدائرة أكثر تماثلا لأنك تستطيع أن تديرها بأى زاوية وتظل كما هى.

هل يوجد شيء أكثر تماثلاً من الدائرة؟ بالطبع: الكرة فإذا أخذت دائرة وأدرتها خارج المستوى الذى تقع فيه فمن الواضح أنها لن تكون كما هى. ولكن الكرة تظل كما هى بصرف النظر عن كيفية إدارتها وبالتالى فلها زمرة تماثل أكبر من الدائرة.

دعنا نعود إلى أغشية D. من الصعوبة ملاحظة عشرة أو ستة وعشرين بعدًا. ولذلك دعنا نتخيل أننا تخلصنا بطريقة ما من كل الأبعاد الإضافية ولم يتبق إلا الأبعاد الأربعة المعتادة. فإن غشاء D0 له تماثل الكرة. وأى جسيم نقطى له نفس التماثل على مستوى مناقشتنا الحالية. والسبب أن النقطة تبدو كما هى من أى زاوية مثل الكرة. بينما يمكن لغشاء D1 أن يأخذ أشكالاً كثيرة. ولكن أبسطها للتخيل عندما يكون مستقيمًا تمامًا مثل سارية العلم فيكون له تماثل مثل الدائرة. إذا لم يكن هذا واضحا فتخيل سارية العلم منتصبة فى منتصف رصيف المشاة. بالطبع لن تستطيع إدارة سارية العلم لأنها ثقيلة جدا لكن يمكنك أن تنظر إليها من اتجاهات مختلفة. ستبدو كما هى من جميع الزوايا. وهذا يبدو صحيحًا أيضا بالنسبة للدائرة المرسومة على رصيف المشاة فإنك لن تستطيع أن تديرها لكن يمكنك أن تنظر إليها من جميع الزوايا وستبدو كما هى.

يُعتبر التماثل توسعًا فى مفهوم عدم التغير. ربما يبدو هـذا مـضجرًا فمـا معنى أن أ له العمر نفسه مثل ب. لكن يوجد اتجاهان للتوسـع وهـذا مـا يجعـل الموضوع أكثر إثارة بالنسبة لى. أولا التفكر فى المائدة الدوارة (بالنسبة للأشخاص الأصغر سنًا من المؤلف فلنتذكر أن المائدة الدوارة هى جزء من جهـاز التـسجيل والذى نضع عليه أسطوانة التسجيل). وإذا كانت هذه المائدة الـدوارة جيـدة جـدًا فسيكون من الصعب بمجرد النظر القول بأنها تدور أو لا تدور وهذا بسبب أن لهـا تماثلاً مثل الدائرة. لكن تخيل أننا وضعنا عليها الآن أسطوانة فسوف نستطيع القول إنها تدور لأن الجزء المركزى من الأسطوانة يكون مطبوعا عليه بعض الكلمـات. لكن لنتجاهل هذا الآن. إن الحفر على الأسطوانة على شكل حلزونى فـإذا نظـرت قريبا فسوف ترى أن الحلزون يتحرك. وستبدو كل حفرة كما لو كانت تتحرك أبطأ فأبطأ إلى الداخل. وإذا وضعت إبرة على الأسطوانة فـسوف تتبـع الحفـرة إلـى الداخل. وإذا حركت مائدة الدوران بحيث تدور عكسية فإن الإبرة سـوف تتحـرك بطيئا إلى الخارج. والنتيجة أن الدوران المتصل ليس مثل الوقوف ساكنًا. والحقيقـة أننا لا نحتاج الأسطوانة لتخبرنا بذلك: فإنها فقط تساعد علـى إظهـار أن الحركـة الدائرية تمكن ملاحظتها بطرق واضحة أو بطرق بارعة.

وتدور الجسيمات مثل الإلكترونات والفوتونات أبديًا. والتعبير الذى يفـضله الفيزيائيون أنها تلف مثل النحلة الدوارة. ويمكن للإلكترونات أن تلف فى أى اتجـاه تريده: بمعنى أن محور الدوران يكون فى أى اتجاه. ويشير الفيزيائيون غالبًا إلـى أن محور دوران الإلكترون هو اتجاه دورانه. ويمكن لمحور الدوران أن يتغير مـع الزمن لكن فقط تحت تأثير المجال الكهرومغناطيسى. وتلف نوى الذرات بالطريقـة نفسها مثل الإلكترونات. ويستغل التصوير بـالرنين المغناطيـسى هـذه الخاصـية فباستخدام مجال مغناطيسى قوى فإن ماكينة الرنين المغناطيسى تجعل اتجاهات لف البروتونات فى ذرات الهيدروجين فى جسم المريض كلها فى اتجاه واحد. ثم ترسل

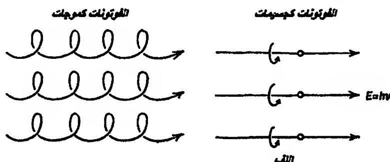
الماكينة موجات راديو التى تغير قليلاً من اتجاهات لف بعض البروتونات. وعند عودة اللف إلى الاتجاه المضبوط فإنها تشع موجات راديو إضافية وهذه الموجات المشعة تمثل صدى للموجات الأولى التى أرسلتها الماكينة. وبكثير من التعقيدات والخبرة يتعلم الفيزيائيون والأطباء كيف يمكنهم الاستماع لهذا الصدى. ويكتشفون ما تخبرهم به الموجات عن الأنسجة التى أنتجتها.

وتلف الفوتونات أيضًا لكن ليس فى أى اتجاه فينبغى أن يكون محور الدوران منطبقًا مع اتجاه حركتها. وهذا القيد يقع فى قلب فيزياء الجسيمات الحديثة وهو ناتج من نوعٍ جديد من التماثل يُسمى التماثل المعيارى. وكلمة المعيار ترمز إلى نظام قياس أو جهاز قياس. كمثال فإن معيار ضغط الإطارات هو جهاز لقياس الضغط داخل الإطار. ومعيار بندقية الصيد هو طريقة لمعرفة قطر ماسورة البندقية. وفى الفيزياء عندما يمكن لشىء أن يُوصف بطرق مختلفة متعددة ولا يوجد سبب سابق لتفضيل إحداها على الأخرى فإن المعيار هو اختيار خاص لنوع الوصف الذى تستخدمه. بينما يرمز التماثل المعيارى إلى تكافؤ المعايير المختلفة. ويُعتبر المعيار والتماثل المعيارى حقًا مفهومين مجردين ولذا دعنا نعتبر تشابهًا مألوفا قبل التعمق أكثر. فلقد ألمحت سابقًا إلى أنه من الصعوبة معرفة ما إذا كانت مائدة الدوران تدور أو لا تدور لأنها متماثلة. والطريقة المناسبة لعلاج هذا هو أن تضع إشارة على حافة المائدة الدوارة بوضع نقطة من الحبر ولا يهم أين تضع هذه النقطة: فمثلاً يمكنك وضع النقطة على الجانب القريب منك وكذلك يمكن أن تضعها على الجهة المقابلة: ومهما كان وضع النقطة فإن حركتها تجعلك تدرك فى لحظة أن المائدة تدور. واختيار مكان وضع النقطة يماثل اختيار المعيار. والحرية فى تحديد مكان النقطة تشبه التماثل المعيارى.

وللتماثل المعيارى نتيجتان مهمتان للوصف الكمى للفوتونات. الأولى يضمن أن الفوتون ليست له كتلة وبالتالى فهو دائمًا يتحرك بسرعة الضوء. والثانية

يقيد محور اللف ليكون دائمًا مضبوطًا فى اتجاه الحركة نفسها. ومن الصعب بالنسبة لى شرح كيف أن هذين القيدين ينبعان من التماثل المعيارى دون الدخول فى رياضيات نظرية المجال الكمى. ولكن ما أستطيع فعله هو شرح العلاقة بينهما. لنعتبر أولاً إلكترونًا له كل من الكتلة واللف. فإذا كان الإلكترون ساكنًا فلن يكون ذا معنى أن نقول إن اللف يجب أن يكون باتجاه الحركة ببساطة لأنه ليس متحركًا. والفوتون على الجانب الآخر يجب أن يتحرك دائمًا بسرعة الضوء ولا تستطيع الحركة دون التحرك فى اتجاه معين. ولذا فعلى الأقل يوجد معنى لتقييد محور لف الفوتون ليكون مضبوطًا مع اتجاه حركته. واختصارًا فإن أول قيد (عدم وجود كتلة) هو ضرورى للقيد الثانى (ضبط اتجاه اللف) لأن يكون له معنى.

ونتائج التماثل المعيارى تجعله يبدو كفكرة مختلفة تمامًا عن التماثلات التى ناقشناها سابقًا. إنه أكثر من مجرد مجموعة من القواعد. فإن الفوتون لا يستطيع أن يظل ساكنًا بسبب التماثل المعيارى ولا يمكنه اللف فى اتجاه محدد بسبب التماثل المعيارى. وهناك شىء آخر مهم يجب أن نعلمه: الإلكترونات لها شحنة بسبب التماثل المعيارى.



الفوتونات كموجات وكجسيمات. يتفق محور اللف مع الحركة فى حالة وصفها كجسيمات. لكن فى حالة وصفها كموجات يكون للمجال الكهربائى شكل قلاووظ. وإذا كان لكل الفوتونات اتجاه اللف نفسه فإن الضوء يوصف بأنه مستقطب دائريًا.

والتشابه بين التماثل المعيارى والتماثل الدورانى للمائدة الدوارة يساعدنا على توضيح هذه النقطة الأخيرة. فالتماثل المعيارى للإلكترون يشبه التماثل الدورانى: فيمكن للمرء التحدث عن الدورانات المعيارية ولكن الدورانات المعيارية ليست دورانات فى الفراغ، إنها أكثر تجريدًا وهى مرتبطة بالطريقة التى يمكن للمرء أن يصف بها الإلكترون من وجه نظر ميكانيكا الكم. وكما أن المائدة الدوارة تدور بمعدل ثابت (عندما تعمل) فإن الإلكترون يدور لكن بمعنى أكبر من وجهة نظر ميكانيكا الكم ويرتبط بالتماثل المعيارى. وهذا الدوران يمثل شحنته الكهربائية. والشحنة الكهربائية تكون سالبة للإلكترونات وموجبة للبروتونات بما يعنى أنهما يدوران فى اتجاهات معكوسة فى المعنى المجرد المرتبط بالتماثل المعيارى.

ومن هذا يتضح أن الأبعاد الإضافية تساعد على جعل هذه المناقشة عن الشحنة أكثر دقة. فإذا كان هناك بعد إضافى زائد على شكل دائرة يمكنك أن تتخيل أن جسيمًا يتحرك حول هذه الدائرة. ويمكنه التحرك للأمام أو للخلف. فإذا كانت هذه الدائرة صغيرة حقًا فإنك لا تستطيع ملاحظتها مثل الأبعاد الأربعة المعتادة. وبالرغم من هذا فإن الجسيمات الأساسية تستطيع أن تلف هذه الدائرة إلى الأمام أو الخلف. فإذا تحركت للأمام فسوف تكون لها شحنة موجبة، وإذا تحركت للخلف فستكون لها شحنة سالبة. وكل هذا الترتيب يعتمد على البعد الإضافى الدائرى ولذلك فإنه ليس من الغريب أن نتعلم أن تماثلات الدائرة لها صلة بالتماثل المعيارى. ففى الحقيقة فإن التماثل المعيارى للشحنة الكهربائية يكافئ تماثل الدائرة. وربما يبدو هذا كجملة مجردة لكن له نتيجة فورية فالحركة على الدائرة إما إلى الأمام أو الخلف ولا يوجد أى اتجاه آخر وبالطريقة نفسها فإن الشحنة الكهربائية تكون موجبة أو سالبة ولا يوجد أى نوع آخر من الشحنة.

وفكرة شرح الشحنة الكهربائية بدلالة البعد الإضافى الدائرى سبقت نظرية الوتر فهى أقل قليلاً من مائة سنة عمرًا ولكنها لم تدخل حيز العمل على نحو كمى.

وجزء من الطموح العظيم لنظرية الوتر هو جعل هذه الفكرة تبدأ فى التحقق. وفى الحقيقة فإن لدينا مجموعة من الأبعاد الإضافية لنستخدمها ولهذا ينبغى أن يكون هناك بعض الأمل. وبصرف النظر عمًا إذا كنا على الطريق الصحيح أم لا بالنسبة للأبعاد الإضافية فإن فكرة التماثل المعيارى سوف تبقى. فالشحنة الكهربائية وتفاعلاتها مرتبطة أساسًا بتماثلات الدائرة والحركة حول الدائرة.

ويبدو أننا بعدنا عن أغشية D ولكن هذا ليس حقيقيًا فإن أغشية D تمدنا بأمثلة لكل شيء ناقشناه. فلقد رأينا سابقًا كيف أن لأغشية D تماثلات دورانية: ولنتذكر المقارنة بين غشاء $D1$ وسارية العلم التى يكون تماثلها الدائرى مشابهًا لتماثل الدائرة. وتساعد التماثلات الدائرية على فهم خواص أغشية D. ولكن التماثل المعيارى يلعب دورًا كبيرًا أيضًا. ونلاحظ هنا أول دلالة للعلاقة بين التماثل المعيارى وأغشية D. فإذا بدأت بغشاء D1 وجعلته مشدودًا باستقامة ووضعته فى مكان معين فإن هناك موجتين صغيرتين سوف تتحركان حيثما وضعته. وسوف تتحرك هذه الموجات بسرعة الضوء وهى تشابه الجسيمات عديمة الكتلة. ولا شيء سوف يجعلها تقف ساكنة. وقد شرحت أن الجسيمات عديمة الكتلة مثل الفوتونات تكون مرتبطة بالتماثل المعيارى وخاصية عدم وجود كتلة لها مؤكدة بالتماثل المعيارى. وهذا بالضبط ما يحدث مع الموجات على غشاء D1 وأنا أقوم بتبسيط شديد للموضوع لأن هذه الموجات لا تشبه تمامًا الفوتونات، فليس لها لف. لكن إذا كنا سنناقش الموجات الصغيرة على غشاء D3 فإن البعض منها سوف يكون له لف وسوف يصبح لها الوصف الرياضى للفوتونات نفسه. وبمجرد اختراع أغشية D3 فقد بدأ الناس فى محاولة بناء نماذج للعالم حيث الأبعاد المعتادة هى ذاتها الموجودة على أغشية D3. لكن لا تزال توجد أبعاد إضافية ولكننا لا نستطيع الوصول إليها لأننا ملتصقون بالغشاء. وما يبدو أنه يمكن أن يُعطى هذه الفكرة أى فرصة هى أن أغشية D3 تأتى ومعها الفوتونات. وكل ما نحتاجه هو

الخمسة عشر جسيمًا الأساسية. وللأسف فإن غشاء D3 بمفرده لا يستطيع أن يمدنا بها وتُعتبر هذه نقطة بحث نشطة لإيجاد المقومات الأخرى التى تحتاجها لكنى تبنى العالم على أغشية D3.

ولأغشية D فى نظرية الوتر الفائق شحنة تُماثل الشحنة الكهربائيـــة وهـــذا التشابه يعتبر دقيقًا جدًا فى حالة أغشية D0. فلها شحنة يمكن أن نقول عنهـــا + ١ ويوجد بالمثل شىء آخر يسمى مضاد الغشاء D0 ويحمل شحنة – ١. لنتذكر الآن مناقشتنا عن الفكرة ذات الأعوام المائة التى تقول إن الشحنة مرتبطة ببعد إضـــافى دائرى. فهذه الفكرة تعمل جيدًا بالنسبة لأغشية D0 وإحدى نقاط التقدم فـــى ثـــورة الوتر الفائق الثانية أن نظرية الوتر الفائق كانت تُخفى بعدًا إضافيًا خلـــف الأبعـــاد العشرة المعتادة. وغشاء D0 الذى نتذكر أنه يُشبه النقطة يمكـــن وصـــفه كجـــسيم يدور حول هذا البعد الحادى عشر والملفوف كدائرة. وإذا تحرك جُـــسيم بالطريقـــة العكسية حول هذا البعد الحادى عشر فإنه يكون مضادًا لغشاء D0. وهـــذا الإدراك هو ما جعل الناس يأخذون الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعـــدًا بطريقـــة جديـــة. وبمعنى ما فإن نظريى الأوتار كانوا يدرسونها طوال الوقـــت دون إدراكهـــا. وقـــد اتضح أن البعد الحادى عشر ليس من الضرورى أن يكـــون ملفوفًـــا فـــى دائـــرة صغيرة. فكلما جعلت هذه الدائرة أكبر فأكبر فإن التفاعلات بـــين الأوتـــار الفائقـــة تصبح أقوى فأقوى. وهى تنقسم وتشتبك بسرعة شديدة، لذا يبدو أنه لا يوجد أمـــل لملاحظتها. لكن كلما تعقدت ديناميكا الوتر فإن بعدًا إضافيًا يظهر أخيرًا. لـــذا فقـــد أصبحت الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا هى أبسط وصـــف للأوتـــار الفائقـــة المتفاعلة بشدة. ونحن لا نعلم بالضبط كيف يمكن دمج ميكانيكا الكم مـــع الجاذبيـــة الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا. ولكننا نشعر بالتأكيد أنه يجب أن توجـــد طريقـــة مـــا لفعل هذا لأن نظرية الوتر هى نظرية كمية تمامًا ومن الواضح أنها تشمل الجاذبيـــة الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا عندما تصبح تفاعلات الوتر الفائق قويـــة. ومجموعـــة الأفكار هذه أخذت فى النهاية اسم نظرية M.

وهناك أمل عظيم لنظرية الأوتار هو أن كل هذه المفاهيم عن الشحنة والتماثل المعيارى ينجم ببساطة من الطبيعة الغامضة للأبعاد الإضافية للعالم. وفى الفصل السابع سوف أناقش بتفصيل أكبر كيف يمكن لهذا أن يتم. وفى الفصلين السادس والثامن سوف أشرح كيف يمكن للأبعاد الإضافية أن تُستخدم لوصف التفاعلات القوية مثل التفاعلات بين الكواركات والجلونات داخل البروتون. ولإعطائكم نظرة عامة مختصرة نقول: فى بعض الحالات أو التقريبات فإن هذه التفاعلات يمكن وصفها حقيقةً بدلالة البعد الخامس. وهذا البعد الخامس يظهر فجأة كما يظهر البعد الحادى عشر فى نظرية M عندما تصبح التفاعلات قوية جدًا بدرجة تصعب ملاحظتها فى الأبعاد الأربعة المعتادة.

إبادة غشاء D

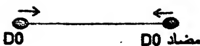
كما شرحت فى الفقرة السابقة فإن أغشية D0 تحمل شحنة ويوجد شىء آخر يسمى مضاد غشاء D0 ويحمل شحنة معاكسة. ماذا سوف يحدث إذا تصادم غشاء D0 مع مضاد غشاء D0 ؟ والإجابة أنهما سيبيد كلٌ منهما الآخر ويختفيان فى انفجار هائل من الإشعاعات. وتُخصص هذه الفقرة لوصف كيف يتفاعل غشاء D0 مع مضاد غشاء D0.

وللبدء دعنا نعود إلى المناقشة التى كانت فى الفصل الرابع عن الأوتار المشدودة بين أغشية D0. وكان الهدف من هذا النقاش هو إخباركم عن الإسهامات الثلاثة لكتلة الوتر. كانت توجد كتلة السكون التى تنشأ من شد الوتر بين الأغشية. وكانت توجد أيضًا الذبذبات التى تشبه حركة أوتار البيانو عند نقرها. كما كانت توجد الإسهامات من التموجات الكمية التى كانت ذات قيمة سالبة ومن الصعوبة

التخلص منها. وكان هذا يمثل مشكلة لأنها تؤدى إلى التاكيونات وهى الأشياء ذات الكتلة التخيلية. وقد ذكرت أن إحدى الطرق للتخلص من التاكيونات هـو تحريـك أغشية D0 بعيدًا عن بعضها لمسافة كبيرة حتى تصبح طاقة الوتر المشدود أكبـر من الإسهام السالب الناتج من التموجات الكمية. وماذا لو بدأنا بأغشية D0 بعيـدة عن بعضها ثم بدأنا فى جعلها أقرب فأقرب؟ وتعتمد الإجابـة علـى التفـصيلات. ولكى نحصل على القصة صحيحة يجب أن نميز بدقة بين أغـشية D0 ومـضاد أغشية D0 فإن الفرق الوحيد بينهما هو الشحنة. ولنعتبر أولاً حالة تقـارب اثنـين من الأغشية D0 من بعضهما، فلهما الشحنة نفسها وهذا يعنى أنهما سوف يتنافران كمثل الإلكترونات لكن لهما أيضًا كتلة وبالتالى فإن لهما شدًا تجاذبيًا على بعـضهما البعض. وهذا التجاذب يلغى التنافر وتكون النتيجة أنهما نادرًا ما يلاحظ كل منهمـا الآخر. لذا فإن الأوتار الفائقة المشدودة بين غشاءى D0 لا يمكن أبـدًا أن تحـول إلى تاكيونات. وهذا مثال بسيط يوضح الحل المعجز لمشكلة التاكيون فـى نظريـة الوتر الفائق.

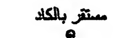
لكن كل شىء يتغير عندما نعتبر غشاء D0 قريبًا من مضاد غشاء D0. فغشاء D0 ومضاد غشاء D0 لهما شحنات معكوسة وبالتالى فإنهما يتجاذبان مثل إلكترون وبروتون. أما شد الجذب فلا يتغير بسبب أن غشاء D0 ومضاد غشاء D0 لهما الكتلة نفسها وتعتمد الجاذبية على الكتلة. والنتيجة أنه يوجد تجاذب شديد بين غشاء D0 ومضاد غشاء D0، والأوتار المشدودة بينهما تدرك هذا التجاذب. والطريقة التى تعرف بها هذا أنها تتحول إلى تاكيونات عندما يقترب غشاء D0 ومضاد غشاء D0 من بعضهما جدًا. وقد لاحظت فى الفصل السابق أن الفهم الحديث للتاكيون أنه شىء غير مستقر والمثال الذى أعطيته كان عبارة عن قلم رصاص يقف على رأسه وفى النهاية يجب أن يسقط. وكذلك غشاء D0 الموجود فوق مضاد غشاء D0 يكون بالمثل غير مستقر وما يحدث كما لاحظت فى بداية

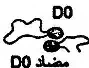
هذه الفقرة أنهما يبيد كل منهما الآخر. وعملية الإبادة تشبه سقوط القلم الرصاص. ويمكن الد. حول على رؤية أخرى بالتفكير فى البعد الحادى عشر على هيئة دائرة. غشاء D0 هو جسيم يدور حول الدائرة بينما مضاد غشاء D0 يدور بالاتجاه المعاكس. فإذا كان غشاء D0 ومضاد غشاء D0 فوق بعضهما البعض فإن الجسيمات سوف تتصادم وعندما يحدث هذا فإن أغشية D تتلاشى فى ومضة من الإشعاعات. وتفاصيل هذه العملية ينبغى أن تعلمنا شيئا حول نظرية M لكن للأسف فإنها ليست مفهومة تمامًا. والمشكلة أن عملية الإبادة سريعة جدًا ومن الصعوبة متابعة الطريقة التى تنتج عنها كمية ضخمة من الطاقة فى فترة زمنية قصيرة. لكن ما نحن متأكدون منه معتمد على المعادلة $E = mc^2$ أن الطاقة الناتجة من التصادم تكافئ ضعف طاقة السكون لغشاء D0. بالإضافة إلى طاقة الحركة المرتبطة بكل من الغشاءين D0 ومضاد غشاء D0 قبل الإبادة.



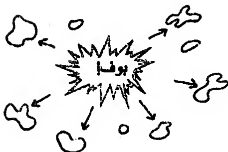












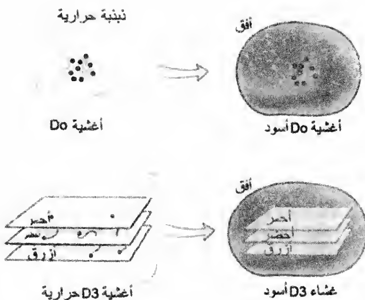


يسارا: يلتقي غشاء D0 ومضاد D0 ويفنيان إلى أوتار. الوتر المشدود بينهما يصبح "تاكيون" عندما يقترب الغشاءان من بعضهما جدًا. والتاكيون غير مستقر ويمثل كم عدم الاستقرار. يمينًا: عندما يكون غشاء D0 بعيدًا عن مضاد D0، فإن التاكيون بينهما يكون مستقرًا. وعندما يقترب الغشاءان D0 ومضاد D0 فإن التاكيون يلتف مما يعني فناء كل من غشاء D0 ومضاد D0.

قد قمت بتقديم أغشية D0 كمواقع فى الزمكان حيث يُسمح للأوتار أن تنتهى عليها. لكن اتضح أنه توجد طريقة أخرى فى التفكير: إنهـا ثقـوب سـوداء ذات حرارة صفر. وطريقة التفكير هذه تكون أفضل عندما يوجد كثير مـن أغـشية D فوق بعضها البعض. دعنا نبدأ بأغشية D0 فكما شرحت فى الفقرة الـسابقة فـإن اثنين من أغشية D0 لا يؤثران بأى قوة على بعضهما البعض فى نظريـة الـوتر الفائق. فإن الشد التجاذبى يُلغى بواسطة التنافر الإلكتروستاتيكى وبالتـالى لا يبيـد أحدهما الآخر كما يفعل غشاء D0 ومضاد غشاء D0. ولهذا يمكن أن نعتبر اثنين من أغشية D0 فوق بعضهما البعض أو حقًا أى عدد منها دون الخوف من حدوث أى عملية عنيفة مثل الإبادة. لكن كلما زاد عدد أغشية D0 تشوه الزمكان القريـب حولها وهذا التشوه يأخذ شكل أفق الثقب الأسود. ولجعل هذا يبدو أكثر صدقًا تخيل مليون غشاء D0 فوق بعضها البعض وغشاء واحدًا فقط D0 يتحرك بالقرب منها وهذا الغشاء D0 الوحيد لا يشعر بأى قوة على الإطلاق ما دام أنه لـيس متحركًـا أما إذا كان متحركًا فإنه يشعر بانجذاب قليل نحو الأغشية الأخرى. ويوجد انجذاب مشابه وهو ما يمنع المليون غشاء D0 من الاختفاء. ولكن كل شيء يكون مختلفًـا فى حالة مضاد غشاء D0 فإنه يشعر بكل من الشد التجاذبى والإلكتروستاتيكى كما شرحت سابقًا. وعندما يقترب جدًا من المجموعة الكبيرة ذات المليون غـشاء D0 فإنه يبدو كواحد من الأسماك الموجودة بالبحيرة والذى تجرأ واقترب من المصرف فجرى امتصاصه. ولا توجد عملية فيزيائية يمكن أن تنقذه عندما يقترب أكثر مـن مسافة محددة. وهذا بالضبط هو مفهوم أفق الثقب الأسود.

وماذا عن الادعاء بأن الأفق له درجة حرارة صفر؟ وهــذا أصــعب فـــى التفسير ويعتمد على تصرف غشاء D0 المنفرد الذى لا يــشعر بــأى قــوة مـــن مجموعة الأغشية الأُخرى. ويتضح أن شرط عدم وجود قوة مرتبط بعمق بدرجــة حرارة صفر. وكلتا الخاصيتين قد دعمتا بواسطة نظرية التماثل الفائق. وقد أجلــت المناقشة الدقيقة للتماثل الفائق حتى الفصل السابع لكن دعنا نُضيف إلـــى معرفتنـــا بالتماثل الفائق هذين التعبيرين: الأول: يربط التماثل الفائق الجرافيتونات بالفوتونات فالجرافيتونات تحكم الشد التجاذبى بينما الفوتونـــات تحكـــم التجـــاذب أو التنـــافر الكهروستاتيكى. والعلاقة الخاصة التى تؤدى إليها نظريـــة التماثـــل الفـــائق بـــين الجرافيتونات والفوتونات هـــى أنهـــا تـــنص علـــى أن قـــوة التجـــاذب والقـــوى الكهروستاتيكية متساوية. الثانى: تضمن نظرية التماثل الفائق ثبـــات أغـــشية D0 بمعنى أنه لا توجد أشياء أخف فى نظرية الوتر التى يمكن أن يتحول إليها غـــشاء D0 إلا إذا قابل مضاد غشاء D0. وبالتالى فإن غشاء D0 بالرغم من كونه ثقيلاً فهو لا يشابه نهائيًا نواة اليورانيوم ٢٣٥ التى يمكن أن تتحلل إلى نوى أخف مثـــل الكربتون والباريوم كما شرحت فى الفصل الأول.

وتتكون المجموعة من أغشية D0 أيضًا مستقرة وبالتالى فلا يمكن لها التحلل لأشياء أخرى. والشىء الوحيد الذى يمكن لها أن تفعله عندما تكون مجتمعة هو أن تتذبذب قليلاً. وهذه التذبذبات تشبه التذبذبات الحرارية للذرات فى قطعة من الفحم. وربمـــا تتذكرون أن التذبذبات الحراريـــة يمكن أن تتحول إلى طاقـــة طبقًا للمعـــادلـــة $E = k_B T$ وتكـــون E هنا هى الطاقة الإضافية بسبب التذبذبـــات الحرارية.



أعلى يسارًا: مجموعة من أغشية D0 ذات ذبذبة حرارية. أعلى يمينًا: يتكون أفق حول أغشية D0 لوصف خواصها الحرارية.
أسفل يسارًا: ثلاثة أغشية D3 فوق بعضها البعض. تمثل الأوتار الممتدة بينها كالجلونات التى يمكن أن تمدها بطاقة حرارية. أسفل يمينًا: يتكون أفق حول أغشية D3 لوصف خواصها الحرارية.

فمثلاً عندما نطبق هذه الصيغة لذرة كربون فى قطعة من الفحم تَكون E هى الطاقة الزائدة للذرات بسبب التذبذبات الحرارية وليست طاقة السكون. والطاقة الكلية لقطعة الفحم يجب أن تشمل طاقة السكون لكل الذرات وطاقات تذبذبها الحرارية. وللذرات أيضًا بعض التموجات الكمية فى مواقعها ومن حيث المبدأ فإنه ينبغى أيضًا أن تدخل هذه الطاقة ضمن الطاقة الكلية للفحم. وهذا يشبه مناقشتنا السابقة عن الإسهامات الثلاثة لكتلة الوتر. والكتلة الكلية لقطعة الفحم يمكن الحصول عليها من طاقتها الكلية باستخدام العلاقة $E = mc^2$.

كل هذه المناقشة بالنسبة للفحم يمكن أن تحدث فى مجموعة من أغشية D0 فلها كتلة سكون ولها أيضًا بعض التموجات الكمية. وفى حالـــة أغـــشية D0 فـــإن التموجات الكمية لا تعطى أى إسهامات للكتلة الكلية (إنه مـــن المـــزعج دائمًـــا أن نتعامل مع التموجات الكمية) ويمكن لأغشية D0 أن يكون لها بعـــض التموجـــات الحرارية أيضًا. وعند حدوث هذا فإن مجموعة أغشية D0 ســـتكون لهـــا حـــرارة وكتلة إضافية لكن لن يكون لها شحنة زائدة. والآن إذا حدث أن غشاء D0 المنفرد اقترب من مجموعة أغشية D0 عند درجة حرارة لا تساوى صـــفرًا فـــإن الكتلـــة الإضافية سوف تؤدى إلى إضافة جاذبية زائدة للشد التجاذبى لغشاء D0 المنفـــرد ولهذا سوف يتم سحبه نحوها. وإذا قمت بتبريد هذه المجموعة من أغشية D0 إلى الصفر المطلق فسوف تفقد هذا الجزء الإضافىّ من الكتلة وبالتالى فلن تبذل أى قوة على غشاء D0 المنفرد. وهذا هو تفسير كيف يمكن أن ترتبط درجة حرارة صفر بشرط عدم وجود قوى.

إذا كنت قد فقدت الاستمرار فى فهم أغشية D0 فدعنا نأخذ راحة ونتحـــدث قليلاً عن الفحم مرة أُخرى. فإن تذبذباته الحرارية تدخل ضمن الطاقة الكلية تمامًـــا مثل مجموعة أغشية D0. وهذه الطاقة الكلية لا تزال طاقة الفحـــم عنـــد الـــسكون ومعنى عند السكون أن الفحم يكون ساكنًا هناك عكس أن يكون طائرًا فى الهـــواء. وطاقة السكون الكلية تترجم إلى كتلة كلية خلال العلاقـــة $E = mc^2$ وبالتـــالى فإن قطعة الفحم تكون حقيقةً أثقل عندما تكون ساخنة أكثر منها عندما تكون بـــاردة بالضبط كما أن مجموعة من أغشية D0 تكون أثقل عندما تكون أسخن. وفى حالة قطعة من الفحم يمكنك استخدام بعض الأرقام وتعرف تمامًا الزيادة فى كتلة الفحـــم بسبب تسخينها. سوف أخبركم كيف يمكن أن نفعل ذلك. درجة حرارة قطعة الفحـــم الساخنة نحو ٢٠٠٠ درجة كلفن وكما تتذكر فإن سطح الشمس يكون أســـخن فقـــط بثلاث مرات. والمعادلة $E = k_B T$ تمثل تقديرًا للطاقة الحرارية الموجودة فـــى

كل ذرة من الفحم ولكنه فقط تقدير. وباستخدام هذا التقدير فقد قمت بحساب الطاقة الحرارية من الفحم الساخن ووجدتها نحو ١٠^-١١ من كتلتها الساكنة. وهذا يمثل جزءًا من مائة بليون وهذا أكثر بكثير من النسبة من كتلة السكون التى يستطيع العداء الأوليمبى تحويلها إلى طاقة حركة فى سباق مائة متر. ولكنها أقل كثيرًا جدًا من النسبة من كتلة السكون التى تتحول إلى طاقة فى الانشطار النووى. وهذا بالضبط ما يفسر كيف أن القدرة النووية تكون واعدة جدًا: فإن طنًا واحدًا من اليورانيوم يُستخدم فى مفاعل نووى حديث يُنتج تقريبًا الكمية نفسها من الطاقة الكهربائية المنتجة من مائة ألف طن من الفحم.

ولقد كانت مناقشة أغشية D0 مبسطة للغاية من ناحيتين. الأولى هناك تفاعل آخر بين أغشية D0 والمتسبب فيها جُسيم دون كتلة ولكنه ليس الفوتون أو الجرافيتون ويُسمى هذا الجسيم الديلاتون وليس له لف. وكل ما ذكرته حول الشد التجاذبى ينبغى أن يمتد ليشمل الديلاتون لكن حتى بهذا التغير البسيط فإن الاستنتاجات الأخيرة تظل كما هى. الثانية إذا كانت أغشية D0 خلف الأفق فمن الصعب معرفة ما إذا كانت تهتز مثل الذرات. وكل ما يمكن قوله بالتأكيد إن هذه المجموعة من أغشية D0 لها بعض الطاقة الإضافية التى تماثل الكتلة الإضافية. والمشكلة الكبرى فى نظرية الوتر إعطاء وصف أكثر دقة للثقوب السوداء المشكّلة من أغشية D المهتزة. وأفضل حالة مفهومة تشمل أغشية D1 وأغشية D5. وهناك نوع آخر مهم وهو أغشية D3. بينما أغشية D0 أصعب فى التعامل معها على نحو كمى لكن لا يزال يوجد بعض التقدم فى هذا الاتجاه.

وحينما ننتقل من مناقشة أغشية D0 كثقوب سوداء إلى أغشية D1 أو أغشية D3 فإن الشيء الأساسى الذى يتغير هو شكل الأفق. فمثلاً أغشية D3 والمحاطة بأفق ثقب أسود من الصعب تخيلها لأن أغشية D3 تنتشر فوق ثلاثة أبعاد مكانية. ويجب عليك أن تتخيل على الأقل بعدًا آخر لتحصل على فكرة دقيقة

عما يُشبهه الأفق. وفى الفصول التالية سوف أحاول شرح هذه الحالة أكثر لأنها حقيقةً أكثرها إثارةً. والآن لنعتبر أغشية D1 فى الأبعاد الأربعة الزمكانية الخاصة بعالمنا بفرض أننا تخلصنا من الأبعاد الستة الأخرى. وعندما نجعل غشاء D1 مستقيمًا فإنه يُشبه سارية العلم وتموجاته هى الموجات الصغيرة التى وصفتها قبلُ. وعندما تجتمع مجموعة كبيرة من أغشية D1 سوف تكون هناك أنواع أخرى من الموجات الصغيرة. وأفضل الطرق للتفكير فى هذه الموجات هو بدلالة الأوتار. فيمكن للوتر أن يضع طرفًا منه على غشاء D1 وطرفه الآخر على غشاء آخر. ويمكنه التزحلق على أغشية D1 فى الاتجاه الذى تم شده فيها. والوتر ذو النهايات غالبًا ما يُسمى وترًا مفتوحًا وهذا على العكس من الوتر المغلق الذى هو من حيث تعريفه حلقة مغلقة. وتعنى إضافة طاقة حرارية لأغشية D1 إضافة أوتار مفتوحة. ومن الغريب أن الأوتار المفتوحة تصف كل التذبذبات الصغيرة الممكنة للغشاء D1. وبكلمات أخرى فإن الأوتار حقيقةً هى الموجات الصغيرة على أغشية D1.

وإذا وُجد عدد ضخم من أغشية D1 فإن المجموعة من أغشية D1 والأوتار المفتوحة عليها تشوه الزمكان القريب ومن ثم يتكون أفق ثقب أسود. وللأفق تماثلات كتماثلات الدائرة بالضبط كما لغشاء D1 المشدود. ويمكنك تخيل الأفق كأسطوانة تُحيط المجموعة من أغشية D1 والأوتار المفتوحة. وهذا يختلف عن الأفق حول مجموعة من أغشية D0 والذى يكون كرويًا. ويُفضل بعض نظريى الوتر استخدام التعبير "الغشاء الأسود" لوصف مجموعة من أغشية D1 مُحاطة بأفق. ويحتفظون بالتعبير: الثقب الأسود للأفق الكروى مثل المحيط بأغشية D0. وأُفضل شخصيًا استخدامًا أوسع قليلاً هو: أغشية سوداء، ثقوب سوداء ما دامت ستكون حركة اللسان أسهل. فمثلاً سوف أصف الأفق الأسطوانى والمحيط بمجموعة من أغشية D1 كأفق ثقب أسود. وسوف أشير إلى الهندسة كليةً كغشاء D1 الأسود.

ومن الناحية التاريخية فمن الشائق أن نلاحظ أن هندسات الثقوب السوداء (أو الأغشية السوداء) التى تصف مجموعة من أغشية D كانت معروفة قبل الفهم التام لأغشية D نفسها. ولفهم الأغشية السوداء فإن كل ما تحتاجه هو أن تكون قادرًا على حل معادلات الجاذبية الفائقة. وإذا كنت لا تزال تتذكر فإن الجاذبية الفائقة تمثل نهاية الطاقة الصغرى لنظرية الوتر الفائق حيث تتناسى كل النغمات التوافقية لتذبذب الوتر وتركز فقط على التذبذبات التى هى بدون كتلة. ومع هذا فإن الجاذبية الفائقة لا تزال معقدة بحق ولكنها أبسط كثيرًا من نظرية الوتر الفائق. وبناء الأغشية السوداء هو واحد من طرق متعددة حيث ساعدت الجاذبية الفائقة على تطوير نظرية الوتر خلال ثورة الوتر الفائق الثانية.

الأغشية فى نظرية M وحافة العالم

لقد ركزت فى مناقشتى حول الأغشية حتى الآن على أغشية D وهذا بسبب أن أغشية D هى الأكثر أهمية والأكثر فهمًا وتحوى مجموعة من الأغشية المتنوعة لكن سيكون من المؤسف أن نترك الأنواع الأخرى من الأغشية. وهذا جزئى بسبب أن هذه الأغشية الأخرى أغرب من أغشية D ومن المحتمل أنه توجد أشياء أخرى ينبغى اكتشافها بالنسبة لها وأغرب هذه الأغشية هى أغشية نظرية M.

وكما أخبرتك فإن نظرية M هى النظرية الكمية التى تحتوى الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا كحد أدنى للطاقة. وبالرغم من مرور أكثر من عشر سنوات على اكتشاف نظرية M فلا تزال العبارة التى ذكرتها حتى الآن هى أهم شيء نعرفه عن هذه النظرية. ولن أتردد فى القول بأن هذا يُمثل شيئًا مُحبطًا. فلا يزال يوجد كثير من نظريات الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا وعلى الأخص

فهذا يشمل نوعين من الأغشية السوداء: غشاء M2 وغشاء M5 وهما يشبهان الأغشية السوداء فى نظرية الوتر التى تصف مجموعة من أغشية D مُحاطة بأفق. وعلى الخصوص فهما يشبهان غشاء D3 الأسود.

وتمتد أغشية M2 فى بعدين مكانيين وأغشية M5 فى خمسة أبعاد. ومثل أغشية D فيمكن أن تشد باستقامة فى الأبعاد الأحد عشر لنظرية M أو ربما يمكنها أن تلتف وتنغلق حول نفسها. وللأسف فنحن لا نفهم جيدًا كيف تتماوج أغشية م. ولكن يمكننا متابعة حركة غشاء M2 منفردًا عندما يكون مشدودًا وتقريبًا منبسطًا. وستشبه حركته الموجات الصغيرة على أغشية D1 التى وصفتها فى الفقرة السابقة. وبالمثل فيمكننا متابعة حركة غشاء M5 منفردًا. لكن عندما توضع مجموعة من أغشية M فوق بعضها البعض فإن القصة تصبح أكثر تعقيدًا وقد تحدث الفهم لعدة سنوات. وببساطة فإن حائط الجهل بدأ يتشقق فقد ظهر عدد من الأبحاث التى تدعى أنها تصف الديناميكا لاثنين أو أكثر من أغشية M2 والموضوعة فوق بعضها البعض. ولكننا لا نزال بعيدًا وبعيدًا جدًا عن مستوى الفهم التفصيلى كما فى حالة الأوتار. فنحن نستطيع أن نتابع كيف يتحرك الوتر سواءً كلاسيكيا أم كميًا وسواء أكان الوتر مستقيمًا أم متقلبًا فى كل المكان. ولا تزال توجد عقبات فى طريق فهم مماثل لأغشية M2. أما أغشية M5 فتعتبر أكثر غموضًا.

ويوجد كذلك نوعٌ آخر من الأغشية فى نظرية M وهو حقيقةٌ مدهش. وهذا الغشاء هو حافة الزمكان حيث ينتهى الفراغ ذاته. وعادةً فى نظرية الوتر فإن الفراغ لا ينتهى بينما أى شىء آخر غير الوتر يمكن أن ينتهى دون وجود غشاء D. ويُعتبر غشاء نهاية المكان هو واحد من أغرب الأفكار فى نظرية M ولكنه حقيقةٌ قد تم قبوله تمامًا. وقد اتضح أنه توجد فوتونات عند حافة الزمكان مثل الفوتونات على أغشية D. ولكن الفوتونات عند حافة العالم تشارك مع نظرية شائقة

تُدعى نظرية المقياس E_8 ذات التماثل الفائق. وكثير من العمل الذى تم فى منتصف الثمانينيات بعد ثورة الوتر الفائق الأولى كان يدور حول فهم هذه النظرية حيث يمكننا اكتشاف نظرية القوى الكهرومغناطيسية والنووية. واتضح أن كل هذا العمل له تفسير من وجهة نظر نظرية M بدلالة الزمكان المُنتهى على غشاء نهاية الفراغ.

ويُمثل غشاء نهاية الفراغ إحدى الطرق التى من خلالها قد تحركت نظرية M على نحو حاسم لما بعد الجانبية الفائقة ذات الأحد عشر بعدًا. وقد احتاج هذا التقدم لاستخدام ميكانيكا الكم. والتطور الآخر الذى حدث هو حساب كتلة كل من أغشية M2 وأغشية M5. وفى الواقع فإن كتلة غشاء M2 لانهائية عندما يكون مشدودًا باستقامة خلال مساحة لانهائية. وهذا ينطبق أيضًا على أغشية M5. والذى فهمناه من ميكانيكا الكم أن الكتلة لكل وحدة مساحات لغشاء M2 هى رقم ثابت. وهذا فى الواقع يمثل معرفة أكثر مما لدينا حول نظرية الوتر ذاتها: فإن الكتلة لكل وحدة طول من الوتر هى كمية اختيارية كما نعلم.

بالإضافة إلى أغشية D وأغشية M ذات الطرازات المختلفة يوجد غشاء إضافى فى نظرية الوتر الفائق وكان هو أول غشاءٍ مفهومٍ. وهو غشاء ذو خمسة أبعاد مثل غشاء M5 لكن يعيش فى عشرة أبعاد وليس فى أحد عشر بعدًا. أحيانًا ما يسمى غشاء 5 السوليتونى. وبسبب عدم وجود اسم أكثر وصفًا فسوف أظل مرتبطًا بالاسم نفسه. والسوليتونات هى مفهوم واسع فى الفيزياء وعلى العموم هى أشياء ثقيلة وثابتة. والمثال الكلاسيكى هو الموجة التى يمكن أن تتحرك خلال قناة دون أن تُفقد أو تتكسر. كلمة سوليتون تستدعى كلمة التفرد ولهذا يُفترض أن تعطينا المعنى أن السوليتون له ذاتيته الخاصة. ونحن نفهم هذه الأيام أن أغشية D لها ذاتيتها الخاصة أيضًا. وبالتالى فإن كل الأغشية يمكن وصفها بحرية على أنها سوليتونات لنظرية الوتر. ولكننى سوف أستخدم هنا كلمة سوليتونى لوصف الغشاء 5 فقط الذى كنت سأبدأ فى التحدث عنه.

وتجدر الإشارة إلى غشاء 5 السوليتونى لسببين، الأول: عندما نبدأ مناقشة ثنائيات الوتر فمن المفيد أن نعرف أن غشاء 5 السوليتونى موجود لأن تماثلات الثنائية تربطه بأغشية أخرى. ثانيًا: فهمنا للغشاء 5 السوليتونى هو مثال للفكرة أن الزمكان ليس له معنى بذاته ولكنه موجود فقط لوصف كيف تتحرك الأوتار. وقد حاولت توضيح هذه الفكرة فى الفصل الرابع بتشبيه الأوتار فى الزمكان بالعربات فى مضمار السباق. وأول ميزة بارزة لمضمار السباق الذى اقترحته يمكن استنتاجها من تسجيل عن حركة عربات السباق وهو أنه حلقة مغلقة. وبالمثل فإن الفكرة الأساسية لغشاء 5 السوليتونى تكون مُشابهة. فإنك تبدأ بافتراض أن الأوتار الفائقة تتحرك على سطح كرة. ولأسباب دقيقة فإن الكرة التى تستخدمها لها بعد إضافى أكثر من تلك التى تشبه سطح الكرة الأرضية. وهذه الكرة ذات الأبعاد الأعلى تسمى كرة – ٣. وما أريد أن أقنعكم به أنها مثل مضمار السباق فى التشبيه السابق: مغلق – محدود وذو حجم محدد. وإذا تذكرنا فإن الأوتار الفائقة دقيقة فى اختيار نوع الهندسة التى تجيزها. فهى تصر على عشرة أبعاد وتصر على أن معادلات النسبية العامة يجب أن تكون مُحققة. فإذا بدأت بكرة –٣ فإنك تحتاج أن تُضيف الزمن بالإضافة إلى ستة أبعاد مكانية. والشكل النهائى سوف يكون شكلاً مميزًا وسأريكم كيف يبدو. فالزمكان بعيدًا عن غشاء 5 السوليتونى يكون منبسطًا وذا عشرة أبعاد. وكلما تحركت إلى الداخل وجدت ثقبًا عميقًا فى الزمكان وله حجم محدد: وهو حجم الكرة –٣ التى بدأت بها. وهذا الثقب العميق مرتبط بثقب أسود تمامًا مثل أى غشاء آخر فى نظرية الوتر. لكن يتضح أنه يُمكنك أن تذهب بأى عمق تشاء داخل غشاء – 5 السوليتونى دون أن تعبر أُفقًا. وما يعنيه هذا هو أنه بصرف النظر عن العمق الذى تسير فيه داخل الغشاء – 5 السوليتونى فإنه يمكنك الدوران والعودة ثانيًا. وتتحول الفيزياء فى العمق داخل الثقب إلى فيزياء شديدة الغرابة: فالأوتار تبدأ بتفاعلات شديدة وفى بعض الأحيان يظهر فجأة بعد إضافى مما يعيدنا ثانيًا إلى أحد عشر بعدًا.

آمل أن يتركك هذا الفصل بانطباعين شـــاملين. أولاً الأوتـــار ليـــست كـــل القصة. ثانيًا القصة الكاملة معقدة ومليئة بالتفصيلات. على الأقل تبدو معقدة ومليئة بالتفصيلات. وفي الغالب عندما تتحول الأشياء إلى درجـــة عاليـــة مـــن التعقيـــد والتفصيلات فإن الفهم العميق في النهاية يبسّط القصة. وتعتبر الكيمياء مثالاً طيبًـــا حيث يوجد نحو مائة عنصر كيميائي مختلف. والفهم الموحد جاء نتيجة إدراكنا أن كل هذه العناصر تتكون من بروتونات ونيوترونات وإلكترونـــات. ويوجـــد أيـــضًا تشابه من الجسيمات الأساسية المتعددة في الفهم التقليدي لفيزياء جـــسيمات الطاقـــة العالية. فتوجد فوتونات، جرافيتونات، إلكترونات، كواركات (ستة أنواع)، جلونات، نيوترونات، وبعض الجسيمات الأخرى. وتهدف نظرية الوتر إلى أن تكون صـــورة موحدة حيث إن كل هذه الجسيمات عبارة عن تذبذبات مختلفة للوتر. ومن المحـــبط عند بعض مستويات المعرفة أن تعرف أن نظرية الوتر الفائق لها خاصية التوالـــد الذاتي للجسيمات المختلفة. فمن الناحية الإيجابية فإن هـــذا التوالـــد يكـــوّن نـــسيجًا محبوكًا بشدة غير عادية حيث لكل نوع من الأغشية القدرة على أن يـــرتبط بكـــل نوع آخر وبالأوتار. هذه العلاقات هي موضوع الفصل التالي.

ومن الصعوبة أن نبقى بعيدًا عن التساؤل هل يمكن أن توجـــد أشـــياء أخـــرى أعمق وأبسط من الأغشية؟ ربما نوع من الأغشية الأوليـــة التـــي منهـــا تتكـــون كـــل الأغشية. وحتى الآن لا يوجد أي تلميح للأغشية الأولية في رياضيات نظريـــة الـــوتر. لكن توجد بالتأكيد تلميحات كثيرة بما يعني أن فهمنا لهذه الرياضـــيات غيـــر مكتمـــل. وثورة الوتر الفائق الثالثة إذا كانت ستأتي أبدًا تواجه الكثير من المشاكل لحلها.

الفصل السادس

ثنائيات الوتر

الثنائية هى تعبير يعنى أنه يوجد شيئان مختلفان ظاهريًا ولكنهما متكافئان. وقد ناقشت مثالاً بالفعل فى المقدمة: رقعة الشطرنج يمكن التفكير بها كمربعات سوداء على خلفية بيضاء أو كمربعات بيضاء على خلفية سوداء. ويعتبر هذا وصفًا ثنائيًا للشيء نفسه. وهذا مثال آخر: رقصة الفالس وربما رأيت هذه الرقصة فى الأفلام القديمة أو ربما تكون قد رقصتها. يواجه الرجل والمرأة كل منهما الآخر قريبين من بعضهما وتوجد طريقة معينة لمسك الأذرع لكن لا تهتم بهذا وما يهم أكثر هو حركة الأرجل فعندما يتقدم الرجل خطوة للأمام بقدمه اليسرى فإن المرأة ترجع خطوة للخلف بقدمها اليمنى. وعندما يتقدم الرجل لليمين فإن المرأة ترجع خطوة لليسار. وإذا دار الرجل فإن المرأة تدور أيضًا لتواجه الرجل. وبصرف النظر عن الحركات الأخرى يمكن أن تعرف تمامًا ما تفعله المرأة بمعرفة ما يفعله الرجل والعكس بالعكس. وهناك نكتة قديمة هى أن الراقص (جنجر) يفعل كل ما يفعله (فريد أستير) لكن بالعكس. وهذا شيء يماثل ثنائية الوتر فكل شيء موجود فى وصف ما يمكن أن يُوجد تمامًا فى وصف آخر.

وعندما تلاحظ رقصة فريد وجنجر فى فيلم قديم فإن سحر الرقصة هو كيف يمكن لكل واحد منهما أن يعكس حركة الآخر. وبالمثل ففى نظرية الوتر عندما تفهم ثنائيةً ما فإنك تحصل على صورة أكثر وضوحًا أكثر مما إذا فهمت جانبًا واحدًا من الثنائية. فرؤيتك لجهة واحدة من الثنائية تماثل رؤيتك لفريد وحيدًا أو جنجر وحيدًا ربما تكون فاتنة ولكنها غير متكاملة.

وهذا مثال حقيقى لثنائية الوتر. وقد تحدثنا عن الأوتار وعن أغشية D1 وكل منها يمتد فى بعد واحد مكانى وكما أوضحت فى الفصل السابق فإننى أريد التركيز على نظرية الوتر الفائق ذات الأبعاد العشرة بدلاً من نظرية الوتر ذات الستة والعشرين بعدًا فلها عدم ثبات بسبب وجود التاكيونات.وتوجد ثنائية وتر شهيرة تسمى ثنائية S (ثنائية قوى – ثنائية ضعيف) التى تبادل الأوتار الفائقة بأغشية D1. وهذا شيء شائق ولكنه وجه واحد للثنائية كما أخبرتك عن رقصة الفالس أن المرأة ترجع خطوة للخلف بقدمها اليمنى عندما يتحرك الرجل خطوة للأمام بقدمه اليسرى. ولكى أعطيك صورًا متكاملة يجب أن أخبرك ماذا تفعل ثنائية S لكل غشاء فى نظرية الوتر الفائق. وقبل أن أفعل هذا ينبغى على أن أضيف شيئًا أكثر تعقيدًا. فتوجد أنواع مختلفة من نظرية الوتر الفائق ويمكن التمييز بينها بمعرفة أنواع الأغشية المسموح بها. ونوع نظرية الوتر الفائق الذى أريد التحدث عنه يسمى نوع IIB وهذا الاسم لا يصفها جيدًا وقد اختير قبل فهم كثير من ديناميكا نظرية الوتر الخاصة هذه. ولكننى سأظل مستخدمًا الاسم نفسه. وهذا النوع من نظرية الوتر له أغشية D1 ، D3 ،D5 ، أغشية 5 السوليتونية وعدة أغشية أخرى من الصعب شرحها. ولكنها لا تحتوى على أغشية D0 أو أغشية D2 ولا أى أغشية أخرى ذات رقم زوجى. وتُعتبر نظرية وتر وليست نظرية M ولهذا فليست بها أغشية M2 أو أغشية M5.

وبالعودة إلى ثنائية S التى قدمتها بقولى إن الأوتار تتبادل مع أغشية D1. ولذا ينتج أن أغشية D5 تتبادل مع أغشية 5 السوليتونية وأغشية D3 لا تتأثر بهذه الثنائية. وما يعنيه هذا أنه إذا بدأت بوتر على طرف من ثنائية S فإنك ستنتهى بغشاء D1 على الطرف الآخر. أما إذا بدأت بغشاء D3 على طرف من الثنائية فستنتهى بغشاء D3 على الطرف الآخر. وهناك أشياء أخرى داخل القصة ونستطيع أن نضع معًا بعض التعبيرات حتى أخبركم بشيء جديد. فيمكن للوتر أن ينتهى على غشاء D5 (لأن غشاء D5 مثل أى غشاء *D* يُعرف على أنه الموقع

حيث يمكن للأوتار أن تنتهى). فكيف يمكن لثنائية S أن تؤثر على هـذه العبـارة؟ تعلمنا ثنائية S أن نبدل غشاء D5 بغشاء 5 السوليتونى والوتر بغشاء D1 وبالتالى فإن العبارة الجديدة ستكون غشاء D1 يمكن أن ينتهى فى غـشاء 5 الـسوليتونى. ويمكن اختبار هذا العبارة بمفردها وهى عبارة صحيحة. وثنائيات الوتر تم بناؤهـا تقريبًا بهذه الطريقة: تم افتراض قواعد معينة للترجمة وبالتـالى أُسـتنتجت نتـائج جديدة حيث تم اختبارها.

وبوجه عام فإن ثنائية الوتر هى علاقة ثنائية بين نظريتين للوتر مختلفتـين ظاهريًا أو بين تركيبتين داخل نظرية الوتر تبدوان مختلفتين ظاهريًا. وكـل شـبكة ثنائية الوتر أصبحت معلومةً وهى مرتبطة تمامًا مع بعضها حيث يمكنـك أن تبـدأ بأى غشاء تريده ثم تمر خلال مجموعة من الثنائيات والتشوهات ثـم تنتهـى بـأى غشاء آخر. وسوف أشرح ماذا أعنى بالضبط بالتشوهات. وقبل البدء من الأفـضل العودة إلى نقطة سابقة حول توحيد الصور التى ناقشتها قرب نهاية الفصل الخامس فتوجد أغشية كثيرة مختلفة فى نظرية الوتر. ربما يعتقد الواحد منا أنه فى النهايـة سيجد صورة مجمعة حيث تمثل كل الأغشية ظهورًا مختلفًا لنفس البنيـة التحتيـة. ولكن التماثلات لا تعنى هذا فإنها تضحى بنوع من الأغشية من أجل نـوع آخـر. وأحيانًا تضحى بالأغشية من أجل الأوتار. وحسب مستوى فهمنا الحالى فإنه يبـدو أن كل أنواع الأوتار والأغشية على مستوى متكافئ. وهذا من الناحيـة الوصـفية أكثر مما كان الكيميائيون يفهمونه عن العناصر المختلفة فى الجدول الـدورى قبـل النظرية الذرية. ولكنه أقل مما يفهمه الفيزيائيون عـن العناصـر الكيميائيـة بعـد الرسوخ الشديد للنظرية الذرية.

وقصة ثنائية الوتر بدأت بالضبط عندما كنت طالب دراسات عُليا ولا أزال أتذكر نظرة العلماء إليها بنوع من الشك. هل هذا ما كنـت أرغـب فـى دراسـته حقيقةً؟ بالطبع كان الموضوع جميلاً لكن بدا أيضًا أنه بعيد عن الهدف مـن جعـل

نظرية الوتر نظرية كل شيء. وإحساسى الآن أنه كان يمثل تقدمًا فى فهمنا. وتعتمد بعض أفضل الطرق لربط نظرية الوتر بالتجربة بإحكام على الثنائيات.

ويختلف فهمنا لثنائيات الوتر. فثنائية S هى بالفعل واحدة من أكثر أنواع الثنائيات غموضًا فقاعدة نقل الأوتار إلى أغشية D1 مفهومة جيدًا وتم اختبارها عندما تكون الأوتار أو أغشية D1 مشدودة مستقيمة وتقريبًا عديمة الحركة. ولكن قواعد ثنائية S ليست مفهومة تمامًا للأوتار أو أغشية D1 التى تسير وتصطدم ببعضها البعض بطرق عشوائية. وترتبط الصعوبة بقوة تفاعلات الوتر. وقد شرحت كيف أن انقسام الوتر إلى وترين يشبه انقسام الماسورة إلى ماسورتين صغيرتين ويكون سطح الماسورة مماثلاً لصفيحة العالم للوتر وهو السطح فى الزمكان الذى يمسحه الوتر أثناء مرور الزمن. واتحاد الأوتار يشبه التقاء ماسورتين وتجميعهما فى ماسورة أكبر. وقوة تفاعلات الوتر تحدد ما معدل حوادث الانقسام والاتحاد هذه. فعندما تكون تفاعلات الوتر ضعيفة فإن الوتر يسافر لمدة طويلة قبل انقسامه أو تفاعله مع وتر آخر. لكن عندما تكون التفاعلات قوية فإنه يوجد كثير من الانقسامات والاتحادات مما يؤدى إلى استحالة تمييز الوتر الواحد: فبمجرد أن تميزه حتى ينقسم أو يتحد مع وتر آخر. وعندما تتفاعل الأوتار بقوة فإن أغشية D1 تتفاعل بضعف والعكس بالعكس. ولهذا فإن ثنائية S تحول التفاعلات الضعيفة إلى تفاعلات قوية والعكس.

تعتبر التفاعلات الضعيفة فى نظرية الوتر واضحة وبسيطة وممتازة وتشبه رقص فريد أستير بينما التفاعلات القوية تكون عشوائية وغير مرتبة. وتنطلق الأوتار فى كل مكان ولكنها نادرًا ما تبدو كأوتار لأنها تنقسم وتتحد سريعًا. والنقطة التى أهدف إليها أن ثنائيات الوتر غالبًا ما تربط شيئًا نفهمه جيدًا (مثل نظرية الوتر ذات التفاعلات الضعيفة) بشىء لا نفهمه (مثل نظرية الوتر ذات التفاعلات القوية).

ربما تتذكرون أنه عندما ناقشت نظرية الوتر ذات التفاعلات القوية فـى الفصل السابق فإنه قد ظهر بعد جديد وقد ادعيت أن نظرية الوتر بدأت التـصرف كما لو أنها حقيقةً ذات أحد عشر بعدًا وليس عشرة أبعاد. وهذا مختلف قليلاً عمـا شرحته فى الفقرات السابقة. حقيقة لا تزال فى ذاكرتى نظرية وتر أخـرى. فـإن النظرية التى تُظهر بعدًا إضافيًا عندما يصبح تفاعل الوتر قويًا تُدعى نظرية الـوتر من الطراز IIA. ولهذه النظرية أغشية D0 – أغشية D2 – أغشية D4 – أغشية D6 – أغشية 5 السوليتونية – وبعض أشياء أخرى أصعب فى الـشرح. وعنـدما يكون اقتران الوتر قويًا فإن نظرية الوتر من الطراز IIA تُوصـف أفـضل بأحـد عشر بعدًا. بينما نظرية الوتر من الطرازIIB تُوصـف بمقايـضة أغـشية D1 – بالأوتار دون عمل أى شىء بالنسبة للأبعاد الإضافية.

لقد أكدت بالفعل أنه يوجد كثير مما لا نفهمه حول ثنائيات الوتر. وبالتـالى فإن من الأفضل إنهاء هذه الفقرة باختصار الشيئين اللذين نفهمهما بثقة والخاصـين بكل ثنائيات الوتر. الأول نظرية الطاقة المنخفضة. فتُعتبر الجاذبية دائمًا جزءًا مـن أى نظرية وتر نعرفها. ووصف الجاذبية فى النسبية العامة دائمًا ما يكـون خاصًـا وثابتًا جدًا ولها مجموعة محدودة من التعميمات عبارة عن نظريات الجاذبية الفائقـة والتى ذكرتها فى الفصل السابق. وتشمل نظريات الجاذبية الفائقة ديناميكية الطاقـة المنخفضة للأوتار الفائقة لأنها تشمل فقط النغمات المهتزة الأكثر انخفاضًا للأوتـار الفائقة. ويُعتبر فهمنا للجاذبية والجاذبية الفائقة فهمًا كاملاً مما جعلهما إحدى وسـائل الاختبار لفهمنا ثنائيات الوتر. والوسيلة الثانية للاختبار هـى الأوتـار المـستقيمة الطويلة والأغشية المستقيمة الطويلة. وهذه الأشياء يمكن وصفها كثقـوب سـوداء ذات درجة حرارة صفر فى الجاذبية الفائقة. ولها أيضًا خواص عدم القوة مثل تلك التى وصفتها فى مناقشتى للأغشية D0. وأقل تخصيص لثنائيـات الـوتر يـشمل القدرة على وصف النظرية ذات الطاقة المنخفضة بالإضافة إلى ماذا يحـدث لهـذه الأغشية الطويلة المستقيمة.

أريد أن أناقش فى هذه الفقرة أفضل ثنائية مفهومة وهى تسمى ثنائية T وهـذه الأسماء ثنائية S وثنائية T اختيارية مثل IIA وIIB. ويجد فيزيـائيو الـوتر صـعوبة خاصة فى تسمية الأشياء: فنحن نبحث عند حافة المعرفة ويجب علينا إيجاد أسماء لهذه الأشياء. وغالبًا ما تكون هذه الأسماء اختيارية أو ترمز إلى عمل مبكـر جـدًا حـول موضوع ما. وتميل تلك الأسماء إلى الاستمرار حتى فى حالـة تلاشـى أهميـة هـذه الأعمال. ولذا نجد أنفسنا محاطين بمزيج من الأسماء الغريبة. وأعتقد أن مجالات العلـم الأخرى تقابل الصعوبات نفسها لكن ربما ليست بالدرجة نفسها.

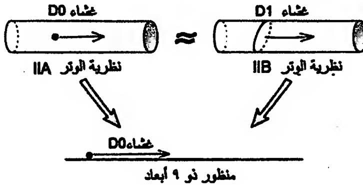
وعلى أى حال فإن ثنائية T هى ثنائية الوتر التى تربط نظرية الـوتر مـن الطراز IIA والطراز IIB وهى مفهومة جيدًا لأن القصة يكون لهـا معنـى فقـط عندما تتفاعل الأوتار تفاعلاً ضعيفًا وهذا يعنى أن الأوتار تـسير مـسافة طويلـة وتظل فترة زمنية طويلة قبل الانقسام أو التقابل.

ومن الواضح أنه توجد مشكلة كبيرة فى ربط نظريات الوتر ذات الطـراز IIA والطراز IIB فنظرية الـوتر طـراز IIA تحـوى أغـشية D ذات الأرقـام الزوجية: D0 ، D2 ، D4 ، D6 بينما الطـراز IIB يحـوى أغـشية D ذات الأرقام الفردية: D1 ، D3 ، D5 فكيف يمكنك أن تنقل غشاء D0 إلـى غـشاء D1 خاصة إذا كان غشاء D1 طويلاً ومستقيمًا ويبدو أن ذلك مـستحيل؟ حـسنًا فهاك الحيلة: سنقوم بلف واحد من الأبعاد العشرة فى نظرية الـوتر ذات الطـراز IIA إلى دائرة. وإذا كانت هذه الدائرة أصغر بكثير من مقياس الطول الذى يمكـن أن تلاحظه فإن نظرية الوتر ستبدو أن لها فقط تسعة أبعاد. ويمكنك الاستمرار فـى

عملية لف أبعاد إضافية حتى تصل إلى أربعة أبعاد. لكن دعنا لا نفعل ذلك فنحن نحاول أن نفهم العلاقات بين نظريات الوتر وليس (على الأقل حتى الآن) علاقتها الممكنة بالعالم. وفى عالمنا الجديد ذى الأبعاد التسعة فإنك لا تستطيع التمييز بين الطرازين IIA وIIB. فمثلاً إذا طوقت غشاء D1 حول دائرة فسوف يبدو كغشاء D0 بالنسبة لملاحظ ذى قدرة على الملاحظة ليست بالدقة الكافية لرؤية حجم البعد الملفوف. وما أعنيه أنه بالنسبة لهذا الملاحظ فإن غشاء D1 الملفوف لن يبدو له أى امتداد مكانى على الإطلاق لكن سيبدو مثل جسيم نقطى: غشاء 0. لكن انتظر! أليس من الممكن لغشاء D1 ألا يلتف لكن بدلاً من هذا أن يمتد فى واحد من الأبعاد التسعة والتى يستطيع الملاحظ الافتراضى أن يراها بوضوح؟ حسناً هذا ممكن ومن الناحية الأخرى يمكن أيضًا أن يلتف غشاء D2 حول البعد الدائرى نفسه وسيكون مظهره مثل الخرطوم الطويل. والقطاع العرضى للخرطوم هو دائرة: وهذا هو البعد الدائرى الملفوف. وكما أنه يمكن للخرطوم أن يلتوى بطريقة أو أكثر اختيارية وبالتالى فإن الغشاء D2 الملفوف يمكن أن يتجول خلال تسعة أبعاد. وبالنسبة للملاحظ ذى الأبعاد التسعة فإن هذا الغشاء يماثل غشاء D1 وهذا بسبب أن هذا الملاحظ لا يستطيع أن يرى بقرب كافٍ ليخبرك أن الغشاء D2 يلتف حول البعد الإضافى، وتستمر القصة كما يمكن لك أن تتخيل: الأغشية D3 الملتفة تتصرف مثل D2 والأغشية D4 الملتفة تتصرف مثل أغشية D3 وهكذا.

ويمكن للمناقشة السابقة أن تعطى الانطباع أن ثنائية T هى فقط حقيقة تقريبية فإن نظرية الوتر من الطراز IIA أو IIB تبدو متماثلة بالنسبة لملاحظ ذى تسعة أبعاد إذا لم يمكنه أن يرى بقرب ليدرك البعد العاشر الملفوف كدائرة. وفى الحقيقة فإن ثنائية T هى ثنائية تامة فعندما تنظر إليها باستخدام اللغة الرياضية الصحيحة فإنها تبدو بسيطة مثل ثنائية لوحة الشطرنج بين المربعات البيضاء والسوداء. وبالرغم من أن اللغة الرياضية ليست فى حوزتنا يمكننى أن أخبرك بأهم

نقطة: نظرية الوتر من الطراز IIA والملفوفة حول بعد دائرى تماثل نظرية الـوتر طراز IIB غير الملفوفة. ولكنه بالعكس يدور حول الدائرة. وبالعكس فإن نظريـة الوتر من طراز IIA الذى يدور حول دائرة يكون الشىء نفسه كوتر مـن الطـراز IIB المتلف حولها.



ثنائية *T*، نظرية الوتر من طراز IIA وIIB وكلتاهما مرتبطة بنظريـة فـى تسعة أبعاد. ويمكن لغشاء 0 فى تسعة أبعاد أن ينشأ من غشاء D0 فى حالة نظرية IIA، أو بالمثل من غشاء D1 الملتف كدائرة فى حالة نظرية IIB.

والشىء الخادع أن الدائرة التى يلتف أو يتحرك حولها الوتر مـن الطـراز IIA لها حجم مختلف عن الدائرة التى يتحرك أو يلتف حولها وتـر مـن الطـراز IIB. ولفهم هذا ينبغى علينا أن نتذكر قليلاً من ميكانيكـا الكـم. فعنـدما يتحـرك إلكترون داخل ذرة فإن له طاقات محددة ومكماة ولكن موضعه وكمية حركته غيـر محددين. والوتر الذى يتحرك حركة كمية حول دائرة يكون مشابهًا لهذا: فله أيـضًا طاقات محددة ومكماة ولكن موضعه غير محدد. وقد اتضح أن كمية حركة الـوتر مكماة مثل الطاقة وهذا شىء طريف لأنه يبدو أن مبدأ عدم اليقين لا يتحقـق فـى صورته العادية عند دراسة الحركة على البعد الدائرى. لكن علـى العكـس فـإن

الرياضة التى تؤدى إلى مبدأ عدم اليقين تخبرنا أنه عندما تكون الدائرة صغيرة جدًا فإن كمية حركة الوتر تكون كبيرة جدًا وبالتالى فإن طاقته تكون كبيرة جدًا أيضًا.وعلى العكس فإذا كانت الدائرة كبيرة جدًا فإن طاقة الوتر المتحرك يمكن أن تصبح صغيرة جدًا. دعنا نقارن هذا الموقف مع طاقة الوتر الملتف حول دائرة.كتلة الوتر الملتف تتناسب مع طوله: بما يعنى أنك إذا ضاعفت الطول فإنك تضاعف الكتلة. وهذه إحدى الطرق التى يتصرف فيها الوتر فى نظرية الوتر تمامًا مثل أى وتر عادى: يكون له كتلة ثابتة لكل وحدة طول. ولذا فإن الوتر الملتف مرة واحدة حول دائرة كبيرة يجب أن يكون ثقيلاً جدًا بينما الوتر الملتف مرة واحدة حول دائرة صغيرة يكون خفيفًا. فإذا كنت ترغب فى إحلال الوتر من الطراز IIA والمتحرك حول دائرة بالوتر من الطراز IIB الملتف حول دائرة ينبغى أن تفعل هذا بطريقة تجعل الطاقات متكافئة.فإذا كانت الدائرة التى يتحرك عليها الوتر من الطراز IIA صغيرة فإن الطاقة تكون كبيرة وهذا يعنى أن الدائرة التى يلتف عليها الوتر من الطراز IIB يجب أن تكون كبيرة. وعلى العكس فإذا كانت دائرة الوتر IIA كبيرة فإن دائرة الوتر IIB يجب أن تكون صغيرة. وإذا قمنا بتصغير الدائرة للوتر IIA أكثر فأكثر فإن دائرة الوتر IIB تصبح كبيرة جدًا حيث يصبح من الصعوبة أن نعرف أنها دائرة أصلاً. ويمكننا أن نصف هذا الموقف بقولنا إن دائرة الوتر IIB تنفتح إلى بعد مكانى مسطح تقريبًا. وربما يذكرك هذا بالثنائية بين نظرية الوتر من الطراز IIA ونظرية M ففى هذه الثنائية فإن البعد الحادى عشر ينفتح عندما تجعل تفاعلات الأوتار قويةً جدًا.

ولقد وعدت أن أشرح كلمة تشوه التى استخدمتها فى الفقرة السابقة عند التحدث عن ثنائيات الوتر. فتغيير حجم دائرة يُعتبر مثالاً للتشوه. وتغيير قوة تفاعلات الوتر مثال آخر. وبوجه عام فما أعنيه بالتشوه هو أى تغيير يحدث بنعومة. فثنائية الوتر ليست بتشوه فعلى العكس فهى علاقة بين نظريتين كل منهما يمكن أن تكون مشوهةً. ويمكنك التفكير فى ثنائية الوتر كتغيير للمنظور فقط: فأنت

تصف الفيزياء نفسها بطريقتين مختلفتين. وأحيانًا تكون إحداهما أبسط كثيـرًا مـن الأخرى: فمثلاً فإن نظرية الوتر من الطراز IIB تكون أبسط جـدًا عنـدما تكـون التفاعلات ضعيفة عنها عندما تكون التفاعلات قوية. ومع هذا فإن ثنائيـة S تبـدل التفاعلات الضعيفة والقوية. وإحدى نقط نفاذ البصيرة الرئيسية فـي ثـورة الـوتر الفائق الثانية أنه عن طريق تشويه نظرية بطرق مختلفـة، والمـرور خـلال كـل الثنائيات المعلومة فإنه يمكننا التحرك من إحدى نظريات الوتر لأى نظرية أخـرى. وقد قدمت إليكم ثلاثة أنواع: ثنائية T التى تربط نظرية الـوتر مـن الطـراز IIA بنظرية الوتر من الطراز IIB. ثنائية S التى تربط نظرية الوتر من الطـراز IIB مع نفسها والثنائية التى تربط نظرية الوتر من الطراز IIA بنظريـة M. وهنـاك أيضًا ثلاث نظريات أخرى للوتر الفائق والثنائيات التى تربط بينها. ولكنى لا أعتقد أنه من المفيد مناقشتها هنا.

ولأول وهلة اعتقدت أنه من الـصعوبة الإحاطـة بكـل الأغـشية والثنائيـات المختلفة. لكن آمل أن توجد نقطة واضحة: الأبعاد المكانية فـي نظريـة الـوتر قابلـة للتحول فهى تأتى وتذهب وتصغر وتكبر. وليس واضـحًا بالنـسبة لـي أن العلاقـات النهائية الرابطة نظرية الوتر بالعالم يجب أن تحتوى أبعادًا إضافية بـذاتها.فـإذا كـان الزمكان مفهومًا تقريبيًا عندما تكون الأبعاد صغيرة فربما يكـون الوصـف الـصحيح للعالم يشمل أربعة أبعاد كبيرة (وهى التى نعرفها ونحبها). ثم بعض الـصفات الأكثـر تجريدًا رياضيًا التى تمثل الأبعاد الإضافية. وهناك بعض الأفكار المشابهة تعود زمنيًـا إلى ثورة الوتر الفائق الأولى ولكنها ليست شائعة هذه الأيام.

الجاذبية ونظرية المقياس

أصبح هناك مجال قائم بذاته لنوع معين من ثنائيات الوتر: ثنائية الجاذبيـة/ الوتر. والغريب فيها أنها لا تربط نظرية الوتر من الطراز IIB بنظرية وتر أخرى

لكن تربطها بنظرية المقياس. وقد ناقشت تماثلات المقياس بتوسع في الفصل الخامس فدعني أُلخص النقاط الأساسية. يضمن تماثل المقياس عدم وجود كتلة للفوتونات وكذلك يضمن له أن يكون محور اللف مضبوطًا مع اتجاه حركته. ويسمح لنا برؤية الشحنة الكهربائية كدوران في فراغ مجرد مرتبط بتماثل المقياس. ونظرية المقياس هي أي نظرية يشمل وصفها الرياضي تماثلات المقياس. وعادةً ما يعني هذا أن النظرية تشمل فوتونات أو أشياء شبيهة بالفوتونات. وتُعتبر نظرية الضوء (وهي أيضًا نظرية المجالات الكهربائية والمغناطيسية) نظرية مقياس بسيطة. وهناك نظريات مقياس أكثر تعقيدًا تعتبر مهمة ليست فقط لنظرية الأوتار لكن أيضًا لفيزيائيي الجسيمات، وفيزيائيي النواة وفيزيائيي المادة الكثيفة.

وربما تتذكرون أن التماثل المقياسي للفوتونات والإلكترونات يشابه تماثلات الدائرة والجسيم المشحون مثل إلكترون له بالفعل دوران حول هذه الدائرة. ولسنا مضطرين لأخذ هذه الدائرة بشكل حرفي مثل ما فعلناه بالنسبة للبعد الحادي عشر لنظرية م. ولكنها موجودة فقط في الرياضيات لتخبرنا عن الشحنة الكهربائية وتفاعلاتها مع الفوتونات. وأحد أوجه هذه الرياضيات أن الفوتونات بذاتها لا تحمل شحنة كهربية ولكنها فقط تستجيب لها.

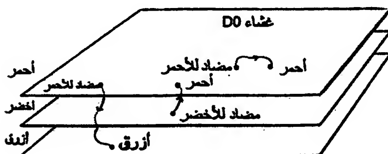
ومن الطبيعي أن نسأل: إذا كانت تماثلات الدائرة مرتبطة بالفوتونات فهل توجد نظرية مقياس مرتبطة بتماثلات الكرة؟ وقد اتضح وجود مثل هذه النظرية ولها ثلاثة أنواع مختلفة من الفوتونات تناظر الطرق الثلاث لإدارة الكرة وما يجعلها مختلفة حقًا عن الفوتونات العادية أن لها شحنة. وربما تتذكرون أنه كان لدينا مناقشة متسعة عن سحابة الجسيمات التقديرية التي تحيط بالإلكترون أو الجرافيتون. ومرة ثانية سوف أُلخص النقاط الأساسية. يوجد اختلاف واضح بين الجاذبية حيث تتكاثر الجرافيتونات باستجابتها لبعضها البعض وبين الكهرومغناطيسية حيث الفوتونات يمكنها أن تتكاثر فقط بالانقسام إلى إلكترونات

التى تنتج فوتونات أخرى. وهذه الحالة الأخيرة هى الأسهل فى الفهم. ويمكنك أن تكتشف كل العمليات المتتالية من الجسيمات التقديرية. ويقال إن الفوتونات والإلكترونات قد أنشأتا نظرية قابلة للاستنظام وهذه النظرية تسمى الإلكترو ديناميكا الكمية. أو بالاختصار QED. والجاذبية على الجانب الآخر ليست قابلة للاستنظام وهذا يعنى أن الجرافيتونات التقديرية المنتجة تكون خارجة عن أى قيد رياضى نفرضه عليها. والآن ماذا عن نظرية المقياس المرتبطة بتماثلات الكرة؟ اتضح أنها تشابه QED أكثر من الجاذبية وبالتالى فهى قابلة للاستنظام.

توجد نظرية أساسية لفهمنا للفيزياء داخل البروتون وهى نظرية مقياس تُدعى الديناميكا اللونية الكمية. أو بالاختصار QCD. وهى تعتمد على مجموعة تماثلات بثمانية أنواع مختلفة من الدورانات.وكالمعتاد فإن هذه الدورانات لا تتم فى الأبعاد الأربعة المعتادة: ولكنها تتم فى فراغ رياضى أكثر تجريدًا يسمى فراغ اللون. ونظرية QCD مشابهة تمامًا لنظرية المقياس المعتمدة على تماثلات الكرة. وهى أكثر تعقيدًا قليلاً لأنه توجد ثمانية أنواع من الدورانات بدلاً من الأنواع الثلاثة السابقة من الدورانات. وكل من هذه الدورانات الثمانية تُناظر جسيمًا يشابه الفوتون. وهذه الجسيمات تُدعى جلونات. وتوجد أيضًا جسيمات مثل الإلكترونات تسمى كواركات لكن بينما تحمل الإلكترونات شحنة سالبة فقط فإن الكواركات يمكنها أن تحمل واحدًا من ثلاثة أنواع مختلفة من الشحنة وهذه الشحنة تسمى اللون.وفراغ اللون هو أداة رياضية لاقتفائها. وشحنة الكوارك يمكن أن تكون حمراء، خضراء، أو زرقاء. وهذه فقط طريقة فى الحديث: فلا توجد حقيقةً أى علاقة لها مع الألوان التى نراها بأعيننا. وكما أن الفوتونات تستجيب لشحنة الإلكترون وبالمثل فإن الجلونات تستجيب لشحنة الكوارك ولكنّ الجلونات بذاتها مشحونة وبالتالى فهى تستجيب لبعضها البعض بالطريقة نفسها التى تفعلها الجرافيتونات. وبعكس الجرافيتونات التقديرية المُنتجة من جرافيتونات أخرى فإن الجسيمات التقديرية المنتجة من الكوارك تُمثل أشياء تمكنك متابعتها رياضيًا

وبالتالى فإن نظرية QCD تعتبر قابلة للاستنظام مثل نظرية QED. واختيارنا للاسم كان جزئيًا بسبب أن QCD تشابه بشدة QED وأيضًا بسبب أن الديناميكا اللونية تعنى ديناميكا اللون. ومرة أخرى هذا المصطلح عن اللون يختلف عما نراه بأعيننا فاللون هو فقط طريقة لتصور التجريد الرياضى.

وجعل ظهور الكواركات، الجلونات، اللون (الذى ليس بلون) نظرية QCD تبدو خيالية كنظرية الوتر. لكنها عكس نظرية الوتر فقد تم اختبارها تجريبيًا بصورةٍ جيدةٍ وقد قُبلت عالميًا كوصفٍ صحيحٍ للفيزياء داخل البروتون. ولها سمات غريبة أشهرها أنه لا يمكنك قياس الكوارك بطريقة مباشرة. وهذا بسبب أنه يحيط نفسه بجلونات وكواركات أخرى لدرجة أنه لا تمكنك رؤية أى شىء سوى حالة مقيدة من الكواركات والجلونات. وتمثل البروتونات تلك الحالة المقيدة وكذلك النيوترونات. ولكن الإلكترونات ليست كذلك ويبدو أنه لا علاقة بينها وبين الكواركات. وبطريقة أدق فإنها على القدم نفسه مثل الكواركات: منفصلة ومتساوية. وإحدى الأفكار الكبيرة لفيزياء الجسيمات الحديثة التى لم يتم التحقق منها هو أن الشحنة الكهربائية يمكنها أن تمثل لونًا رابعًا من الألوان. وسأناقش مجموعة أفكار مثل تلك فى الفصل السابع.



ثلاثة أغشية D3 قريبة جدًا من بعضها وتسمى: أحمر، أخضر، أزرق.
والأوتار المتحركة من غشاء إلى آخر تصف تراوحات الأغشية.

توصف تموجات الأغشية D3 بنظرية مقياس تماثل QCD وقد ناقشت من قبل تموجات الأغشية D1 وقد حصلت على صورتين لهذه التموجات: يمكنك التفكير فى دلالة موجات صغيرة تسافر خلال غشاء D1. ويمكنك التفكير فى الأوتار المرتبطه بغشاء D1 ومنزلقة عليه.وهذا الوصف الأخير يعطى صورة أفضل فى حالة أغشية D3. تخيل أنك وضعت ثلاثة أغشية D3 فوق بعضها البعض ولغرض التوضيح دعنا نميز بينها بإعطائها أسماء أحمر وأزرق وأخضر. فإذا تحرك وتر من الغشاء الأحمر إلى الغشاء الأزرق ينبغى من الناحية التخيلية أن يكون ملونًا. أليس من الممكن أن يكون أرجوانيًا؟ حسنًا لا. والطريقة الأدق لوصف لون الوتر أنه يتحول من الأحمر إلى الأزرق ويبدو هذا بالضبط هو نوع اللون الذى تحمله الجلونات. وبالتالى فإنك تفهم لماذا توجد ثمانية أنواع من الجلونات. فيوجد أحمر إلى أحمر، أحمر إلى أزرق، أحمر إلى أخضر: وثلاثة أنواع تبدأ بالأزرق وثلاثة أنواع تبدأ بالأخضر، وإجماليًا تسعة أنواع. لكن يوجد هنا واحد إضافى. ولسوء الحظ سأضطر إلى تقديم كمية هائلة من الرياضيات الإضافية لشرح لماذا يوجد هنا واحد زائد.

بالإضافة إلى هذه المشكلة البسيطة حول الجلون الزائد فقد رأينا كيف أن الجلونات تنتج من الأوتار على ثلاثيات الأغشية D3. والكواركات تكون أكثر خداعًا فمن الواضح أن وجود ثلاثة أغشية D3 معًا هو مجرد مصادفة. فكان من الممكن أن يكون لدينا واحد فقط وسيكون لدينا فقط الفوتونات مثل الكهرومغناطيسية. وكان من الممكن أن يكونا اثنين وفى هذه الحالة كنا سنحصل على النظرية التى ذكرتها من قبل حيث مجموعة المقياس هى تماثلات الكرة. وكان من الممكن أن يكون هناك رقم ضخم ن وفى هذه الحالة سيكون لدينا الكثير والكثير من الجلونات: نحو ن^{2}.

والخطوة التالية أن نتذكر أنه عندما تكون هناك أغشية كثيرة معًا فإن أفضل وصف لها يكون بدلالة الثقوب السوداء ذات درجة الحرارة صفر. وقد

شرحت هذا فى الفصل الخامس فى حالة أغشية D0. وتكون القصة مشابهة فى حالة أغشية D3. ففى حالة وجود عدد منهما الواحد فوق الآخر فإنها تشوه الزمكان المجاور لها بطريقة تسبب وجود أفق ثقب أسود. ويحيط هذا الأفق بأغشية D3 بطريقة يصعب تصورها بسبب وجود عدد كبير من الأبعاد. ويكون شكل الأفق مشابهًا للأسطوانة فهو دائرى فى بعض الاتجاهات ومستقيم فى أُخرى. ولكن الأسطوانة تكون دائرية فى اتجاه ومستقيمة فى اتجاه آخر وليس لها أبعاد إضافية بالإضافة إلى هذين الاثنين. وهذا الأفق المحيط بأغشية D3 يكون دائريًا فى خمسة اتجاهات وممتدًا فى ثلاثة وبالتالى فله ثمانية أبعاد. ولذا يبدو بعيدًا عن نظرية QCD. أو هذا ما يبدو. وإذا كان هناك بعض الطاقة التذبذبية الزائدة على أغشية D3 فإن الأفق ينمو قليلاً ويحصل على درجة حرارة محدودة.

وهناك جزء مهم فى ثنائية المقياس / الوتر هو تأكدك أنه يمكنك تطبيق الصيغ مثل $\bar{E} = k_B T$ للتذبذبات على أغشية D3 مما يمكنك من فهم درجة الحرارة التى يحصل عليها الأفق المحيط بأغشية D3. دعنى أشرح لماذا يُعتبر هذا ثنائية وتر. توجد طريقتان لوصف أغشية D3 عند درجة حرارة محدودة. إحداهما هى اقتفاء أثر كل الأوتار المفتوحة المنزلقة على أغشية D3 والأخرى هى اقتفاء أثر الأفق المحيط بأغشية D3. وهاتان الرؤيتان متماثلتان بالمعنى التالى: ففى حالة وجود أفق فإنك لا تستطيع أن تجزم بمعرفة ماذا يوجد بداخله وبطريقة أخرى فإن وجود الأفق يمنعك من اقتفاء أثر الأوتار على أغشية D3. فعلى الأقل لن تستطيع اقتفاء أثرها واحدًا فواحدًا. وما تستطيع أن تقتفى أثره هو كميات كلية مثل طاقتها الإجمالية. ولذا يتضح أنه عندما يوجد أفق فإن الجلونات تتفاعل بشدة فهى تنقسم وتتجمع بمعدلات عالية. وهى تحيط نفسها بمجموعات معقدة من الجلونات الأخرى. وكما فى حالة نظرية الوتر ذات التفاعلات الشديدة فإنه يمكن بصعوبة تمييزها كجلونات. وظهور الأفق يشبه إلى حد ما نمو البعد الإضافى لنظرية M فهى تشرح ديناميكا ثابت الاقتران القوى الخاص بالجلونات بلغة تحتاج إلى أبعاد إضافية.

ويوجد كثير من الموضوعات الخاصة بثنائية المقياس/ الوتر أكثر من اقتفاء أثر طاقة الجلونات الحرارية. والطريقة الصحيحة لفهم هذا هو معرفة أن الهندسة المنحنية للثقوب السوداء بجوار أغشية D3 تكافئ تمامًا نظرية المقياس للجلونات على أغشية D3. وهذا تعبير غريب لأن الهندسة المنحنية ذات عشرة أبعاد بينما الجلونات تميز فقط أربعة أبعاد. وهي غريبة أيضًا فهي تربط نظرية تشمل الجاذبية (نظرية الوتر بجوار أغشية D3) بنظرية دون جاذبية (نظرية المقياس على أغشية D3). وهي تبدو في البداية أكثر تركيزًا وأكثر ضيقًا من ثنائيات الوتر الأخرى. فثنائية T كمثال تربط كل نظرية الوتر من الطراز IIB بنظرية الوتر من الطراز IIA. وهي تشمل قواعد نقل كل أنواع الأغشية *D* إلى كل الأنواع الأخرى. بينما ثنائية المقياس/ الوتر يبدو أنها محصورة على ديناميكية نوع واحد من الأغشية: غشاء D3. لكن في الحقيقة فإن بعض الأغشية الأخرى تدخل في ثنائية المقياس/ الوتر بطرق شائقة. فكمثال يمكن السماح بوجود الكواركات بالإضافة إلى الجلونات. وسيكون لدى أقوال أكثر حول ثنائية المقياس/ الوتر سأذكرها في الفصل الثامن حيث سأصف بعض المحاولات لربطها بفيزياء تصادمات الأيونات الثقيلة.

ولإنهاء هذا الفصل دعني أوضح أن ثنائيات الوتر تختلف عن التماثلات بالرغم من أن الاثنين يمثلان مفهوم تطابق الشيئين. ويمكن للشيئين المرتبطين بثنائية الوتر تمييز أعداد مختلفة من الأبعاد. وكما رأينا فإن أحدهما يمكنه أن يشمل الجاذبية بينما الآخر لا يشملها. وهذا يبدو مختلفًا عن الأشكال المتماثلة مثل المربع فكل أركانه هي نفسها وتماثل المربع يشرح بدقة كيف أن المربع مشابه لذاته. وعلى الجانب الآخر فهناك بعض تماثلات الوتر حيث يظهر الجانبان كأنهما صورتان في المرآة. وكمثال فإن نظرية الوتر من الطراز IIA وIIB حقيقةً

متشابهان تمامًا بالرغم من احتوائهما على أنواع مختلفة مــن الأغــشية. وتظهــر تماثلات الوتر في الجاذبية الفائقة ذات الطاقــة المنخفــضة بطريقــة قريبــة إلــى التماثلات المعتادة مثل تماثل المربع. وربما يكون فهمنا لثنائيات الوتر ليس مكــتملاً وربما توجد رؤية موحدة لها تجعل التشابه مع التماثلات المعتادة أكثر دقة.وتوجــد بعض الإيحاءات لوجود مثل هذه الرؤية الموحدة ولكن معظــم مــا نفهمــه مقيــد بالنظريات ذات الطاقة المنخفضة.

الفصل السابع
التماثل الفائق والـ LHC

فى صيف عام ٢٠٠٨ عندما كان تشييد المصادم الهادرونى الكبير أو LHC تقريبًا قد اكتمل، قمت بزيارة الموقع وأخذت جولة لواحدة من تجارب LHC. وأساسًا كنت هناك لحضور مؤتمر ولكن الجولة كانت حقيقةً ممتعةً. كانت التجربة التى زرتها تسمى الملف اللولبى المدمج للميونات وكان حجمها يماثل مبنى ذا ثلاثة طوابق. وقد رأيتها فى المرحلة الأخيرة فى تجميعها. وكان الجزء الثقيل ذو الشكل المخروطى يوضع داخل الجسم الأسطوانى الرئيسى للكشاف. وهو يشبه فى تصميمه كاميرا رقمية ولكن كل أجزائه تنظر داخلاً إلى المركز حيث تحدث تصادمات لإشعاع البروتونات ذات الطاقة العالية.

وبعد انتهاء المؤتمر اقتنصت الفرصة لتسلق جبال الألب الفرنسية. ولم يكن بالشىء الصعب بل مجرد تسلق شاهق إلى حدٍّ ما. وآخر شىء فعلته كان تسلق إحدى قمم الجبل ومنها أخذنا أنا وزميلى فى التسلق "تليفريك" حيث أنزلنا إلى المدينة فى الأسفل. والقمة التى تسلقتها كانت ضيقة ومزدحمة ومغطاة بالثلوج. ولسببٍ ما كان كل المتسابقين مقيدين. ولكننى لم أوافق قط على تدريب التسلق المقيد عندما لا يكون أى من الأشخاص مثبتًا بشدة. فإذا سقط شخصٌ ما ظهرت الصعوبة للآخرين فى منع أنفسهم من السقوط. وعادةً ما أعتقد أنه من الأفضل أن تثق بنفسك وتتسلق غير مقيد. ولكننى تسلقت هذه القمة مقيدًا لزميلى فى التسلق مثل كل الآخرين. وكان رفيقى متسلقًا قويًا ولم تكن القمة بهذه الخشونة.

وبالتأمل فى هذه الأحداث اعتقدت أن الفرق المقيدة المتسلقة لقمة ضيقة تمثل تشابهًا جيدًا مع بوزونات هيجز وهى أحد الأشياء التى يأمـل تجريبيـو LHC أن تُكتشف. لنفكر فى هذا بهذه الطريقة. عند الوقوف على أعلى القمة فإنك ستكون فى وضع توازن ولكنك محفوف بالمخاطر. وكلتا الجهتين شديدتا الانحدار فإذا سـقطت فى أيهما فسيكون الموقف ميئوسًا منه. التاكيونات فى نظرية الوتر مثل ذلك: فهـى متوازنة بطريقة غير مستقرة وأقل اضطراب يجعلها تنزلق أسـفل منحـدر إلـى مصير بدأ فى فهمه علماء الأوتار. ولكن هناك أكثر. دعنا نقول إنه يوجـد ثمانيـة أشخاص مقيدين معًا وأولهم سقط إلى اليسار فإن الشخص الثانى مـن المحتمـل أن يُجذب أيضًا إلى اليسار بينما الثالث ليس لـه فرصـة أن يقـاوم وزن الشخـصين الساقطين وبالتالى سينزلق هو الآخر. والشىء الوحيد الصواب فى هذه الظـروف هو القفز من الناحية الأخرى من القمة والاعتماد على قوة الحبل لكن بسبب ما فإن هذا صعب التنفيذ.

وبالعودة إلى التاكيونات وبوزونات هيجز فإن النقطة التى أريد توضـيحها أن وجود التاكيونات يدل غالبًا على وجود عدم ثبات فى كل نقطة فى الفراغ. وكل نقط عدم الثبات هذه مقيدة معًا مثل المتسلقين المقيدين معًا. فإذا بـدأ تـاكيون فـى الانحدار فى اتجاه ما عند نقطة من الفراغ فإنه يحاول سحب التاكيونـات الأخـرى القريبة معه.

وتصف بوزونات هيجز ماذا يحدث بعد انتهاء التاكيونات من التكثف (تكثف التاكيونات هو اسم علمى لتدفق التاكيونات من القمة). دعنا نتخيل نتيجـة رحيمـة للأفراد طاقم المتسلق سيئى الحظ الذين سقطوا من قمه عالية: لقد انزلقوا أسفل إلى قاع الوادى وانتهوا إلى التوقف بلطف. دعنا نفترض أنهم كانوا فى غايـة التعـب حتى أنهم لم يستطيعوا أن يتسلقوا المنحدر مرة ثانية. بالعكس فقد قـاموا بـالتجول عند القاع. وقاموا أحيانًا بمحاولات لتسلق المنحدر ثم انزلقوا مرة أخـرى. وهـذا

بالتقريب ما تفعله بوزنات هيجز فبمجرد تكاثف التاكيونات فـي كـل نقطـة فـي الزمكان فإن التموجات الكمية حول نقطة سكونها تمثل بوزونات هيجز.

لكن توجد مشكلة فى التشابه بين المتسلقين المقيدين وبوزونـات هيجـز أن الاتجاه الذى تتحرك فيه بوزونات هيجز ليس واحدًا من الأبعاد الثلاثة المألوفة للمكان بل على العكس يشبه بعدًا إضافيًا فى الزمكان ولكنه أكثر لطفًا من الناحية الرياضية. ويجب أن ندرك بوضوح أن بوزونات هيجز افتراضية فربما لا توجد أصلاً.

وبالرغم من الوضع الافتراضى لبوزونات هيجز فإنه توجد نظرية عميقـة محبوبة ويعتمد عليها وقد بقيت كأفضل نظرية لعشرات السنين لوصف ما يـسمى فيزياء الجسيمات وهى تُدعى النموذج القياسى. وكلمة قياسى تشير إلى أنها كانـت مقبولةً عامةً وكلمة نموذج تستحضر الحقيقة أنها لا تزال مؤقتـة وبالتأكيـد غيـر مكتملة. وتوجد أشياء كثيرة فى النموذج القياسى أكثر من مجرد تكاثف التاكيونات. ومن ضمن هذه الأشياء فإنه يقال إن بوزونات هيجز تتحكم فى كتـل الجـسيمات دون الذرية مثل الإلكترونات والكواركات. وكان لدينا الأمل لـسنوات أن يـستطيع مفاعل يسمى تيفاترون بجوار شيكاغو إيجاد بوزونات هيجـز. ولا يـزال يوجـد بعض الأمل أنه يمكن تحقيق ذلك. لكن LHC ينبغى أن يجد إما بوزونات هيجز أو أشياء أخرى غريبة تحل محل بوزونات هيجز. ووجدت إمكانية مبكرة فى تكـساس وهى المفاعل المسمى بالمصادم الفائق ذى الموصلية الفائقة وكانت له فرصة أكبـر لعمل اكتشافات جديدة ومثيرة. وقد تم بدء التشييد في عام ١٩٩١ وفى عـام ١٩٩٣ رفض الكونجرس المشروع مما تسبب فى تـوفير عـشرة بلايـين دولار لـدافعى الضرائب الأمريكية. ولكنى أعتقد أنه كان اختيارًا خاطئًا وهو يعنـى بالتأكيـد أن أمريكا تخلت عن سيطرتها فى الفيزياء التجريبية للجـسيمات لأوروبـا للمـستقبل القادم. ولحسن الحظ فإن الأمم الأوروبية ظلّت هى الأساس فى بنـاء LHC وقـد أسهم الأمريكان بوضوح فى مجهودات LHC. ولهذا فإننا على حافـة اكتـشافات كبيرة ومهمة.

الرياضيات الغريبة للتماثل الفائق

هناك أمل أن يتم اكتشاف التماثل الفائق داخل LHC وهو التماثل الذى يحفظ اتزان نظرية الوتر الفائق. ويتم هذا بإزالة التاكيونات كما شرحتُ باختصار فى الفصل الرابع. وهو أيضا التماثل الذى يربط الجرافيتونات والفوتونات ويضمن ثبات أغشية D0 كما ناقشتُ فى الفصل الخامس. ويختلف التماثل الفائق عن نظرية الوتر منطقيًا ولكنهما مرتبطان ببعضهما بعمق. ولذا فإن اكتشاف التماثل الفائق يعنى أن نظرية الوتر تمضى على الطريق السليم. لكن يوجد بعض المتشككين الذين يزعمون أنه يمكننا أن نجد تماثلاً فائقًا بدون نظرية الوتر. وبينما هذا صحيح على مستوى ما فإننى أعتقد أن وجود التماثل الفائق دون نظرية الوتر سوف يكون مصادفة أكبر من أن تُصدق.

لكن ما بالضبط التماثل الفائق؟ ولقد درت حول هذا السؤال عدة مرات بالفعل فى هذا الكتاب. دعنى أنطلق مباشرةً نحو هذا السؤال. يستدعى التماثل الفائق بعض الأبعاد الإضافية من نوع خاص وتقاس الأبعاد المعتادة وكذلك الأبعاد الإضافية لنظرية الوتر بالطول. والطول هو رقم :٢ بوصة، ١٠ ك م وهكذا. ويمكنك جمع طولين لتحصل على طول آخر. ويمكنك ضرب طولينَ لتحصل على مساحة. ولكن الأبعاد الإضافية للتماثل الفائق لا تقاس بالأعداد. على الأقل ليست الأعداد المعتادة. ولكنها تُوصف بالأعداد ذات الإبدالية المضادة التى تعتبر حجر الأساس للرياضيات الغريبة للتماثل الفائق. وتلعب الأعداد ذات الابدالية المضادة دورًا أيضًا فى وصف الإلكترونات، الكواركات، التى تسمى إجمالاً الفيرميونات. بالرغم من أننى لم أُعرِّف بعد الإبدالية المضادة أو الفيرميونات فسوف أستخدم هذه الكلمات للرغبة فى تسمية الأشياء بأسمائها الحقيقية أو بأقرب ما يمكن لأسمائها

الحقيقية دون استخدام الكثير من الرياضيات. وتُدعى الأبعاد الإضافية للتماثل الفائق بـ "الأبعاد الفيرميونية".

وسوف أحاول وصف هذه الأبعاد الفيرميونية. يمكنك أن تختار لتتحرك نحوها أو لا. مثلما يمكنك أن تتحرك أمامًا أو جانبًا. لكن إذا تحركت خلال الأبعاد الفيرميونية فإنه توجد سرعة واحدة فقط يمكنك التحرك بها. وكلمة سرعة هي تقريب سيئ لمعنى التحرك فى الأبعاد الفيرميونية. وما هو أقربُ وإنْ كان لا يزال ناقصًا فهو اللف. والحركة فى الأبعاد الفيرميونية تعنى أنك تلف أكثر من حالة عدم الحركة. واللف للنحلة يكون أكبر أو أصغر معتمدًا على القوة التى أدرتها بها. ولكن الجسيمات الأساسية يمكن أن تكون لها كمية محدودة فقط من اللف. فبوزونات هيجز (إذا كانت موجودة) ليس لها لف. والإلكترون له أقل قيمة للف. والفوتون له ضعف هذه الكمية: ولكن كما علمنا مسابقًا فإن محور اللف ينبغى أن يكون فى اتجاه الحركة. والجرافيتون له لف ضعف الفوتون. ولا يوجد جسيم أساسى يمكنه اللف أكثر من الجرافيتون. وإذا كان التماثل الفائق صحيحًا فإن بوزونات هيجز لا تكون متحركةً إطلاقًا فى الأبعاد الفيرميونية بينما الإلكترون يتحرك فى بعد واحد فقط، والفوتون فى بعدين. ولكن القصة تصبح أكثر إثارةً بالنسبة للجرافيتونات: فاعتمادًا على عدد الأبعاد الفيرميونية الموجودة فربما يكون جزء من اللف للجرافيتونات ناشئًا عن حركتها فى الأبعاد الفيرميونية بينما الجزء الآخر يكون ناشئًا عن الأبعاد المعتادة للزمكان.

واختصارًا يوجد نوع من الاستبعاد لهذه الأبعاد الفيرميونية. إما أن تتحرك فيها (مثل الإلكترون) أولا تتحرك (مثل بوزون هيجز). وهذا الاستبعاد له ظهور آخر يسمى مبدأ الاستبعاد. وينص هذا المبدأ على استحالة إحلال اثنين من الفيرميونات فى الحالة الكمية نفسها. وتعتبر الإلكترونات فيرميونات ويوجد اثنان منها فى ذرة الهيليوم. وهذان الإلكترونان لا يمكن أن يوجدا فى الحالة نفسها فيجب

عليهما التذبذب حول نواة الهيليوم بطريقة مختلفة. أو يجب عليهما أن يكـــون لهمـــا لف مختلف أو كلاهما. وتعريف الفيرميون هو شيء يخضع لمبدأ الاستبعاد.

والبوزونات هى باقى الجسيمات: الفوتونـــات، الجرافيتونـــات، الجلونـــات، وبوزون هيجز- إذا كان موجودًا. وتختلف البوزونات جدًا عن الفيرميونات فليست فقط مسموحًا لها أن تكون فى الحالة نفسها مثل البوزونات الأخرى ولكنها تفـــضل ذلك. والتماثل الفائق هو علاقة بين البوزونات والفيرميونات. فلكل بـــوزون يوجـــد فيرميون والعكس بالعكس. كمثال إذا كان بوزون هيجز موجودًا والتماثـــل الفـــائق صحيحًا يوجد فيرميون هيجز وهو المسمى أحيانًا هيجزينـــو. ويُعتبـــر الهيجزينـــو أساسًا مثل بوزون هيجز ولكنه متحرك فى واحدٍ من الأبعاد الفيرميونية.

من الصعوبة رسم الأبعاد الفيرميونية والطريقة المعتادة لدراستها تكون من خلال بعض القواعد الغريبة للجبر. دعنا نقول إنه يوجد بعدان يرميونـــان ونـــسمى كل واحدٍ منهما بحرفٍ: مثلاً a, b ويمكنك جمعهما وضربهما معًا ومعظم قواعـــد الجبر تنطبق هنا، كمثال

$$a + a = 2a$$

$$2(a + b) = 2a + 2b$$

$$a + b = b + a$$

لكن توجد قواعد غريبة جدًا لضرب الكميات الفيرميونية معًا:

$$a \times b = -b \times a$$

$$a \times a = 0$$

$$b \times b = 0$$

والطريقة التى تفكر بها فى هذه المعادلات أنى أعنى أن ١ تتحرك فقط فـــى أبعاد بوزونية بينما a تعنى أنك تتحرك فى البعد الفيرميونى الأول وب تعنى أنـــك تتحرك فى البعد الفيرميونى الثانى. وإذا حاولت أن تتحرك مقدار الضعف فى البعد الفيرميـــونى الأول يمكـــن أن تـــصف هـــذا أنـــه $a \times a$ ولكـــن المتـــساوية $a \times a = 0$ تقول إن الحركة التى تحاولها غير مـــسموح بهـــا. بينمـــا معنـــى $a \times b = -b \times a$ أصعب عند الشرح. وسنرى كيف أنها جزء أساسى من جبر الكميات الفيرميونية. دعنى أُعيد صياغة قاعدة الـضرب بالطريقـــة الآتيـــة: $q \times q = 0$ لأى تجميعه q من الكميات الفيرميونية فـــإذا كـــان $q = a$، نحصل على $a \times a = 0$، وإذا كان $q = b$ نحصل علـــى $b \times b = 0$ لكن ماذا يمكن أن نحصل عليه إذا كان $q = a + b$؟. دعنـــا نُجـــرى عمليـــة الضرب:

$$(a + b) \times (a + b) = a \times a + a \times b + b \times a + b \times b$$

وأنا أُراهن أنكم معتادون على القيام بهذا النوع من الـضرب فـــى فـصول الرياضيات بالمـدارس العليـــا. ولقـــد افترضـــنا أن $q \times q = 0$ لأى كميـــة فيرميونية إذا كانت a أو b أو $a + b$ وإذا استخدمنا هذا الفرض فـــإن مفكـــوك الضرب يؤدى إلى:

$$0 = a \times b + b \times a$$

وهذا هو نفسه $a \times b = -b \times a$ الذى أردت أن أشرحه. والفكـــرة الأساسية التى نستنتجها من هذه المناقشة أن الأبعاد الفيرميونية تتطلب بعض الجبر الظريف. ويمكنك حتى القول إن الأبعاد الفيرميونية ليست سوى القواعـــد الجبريـــة التى تصفها.

ويمثل التماثل الفائق تماثلاً بسبب الدوران بين الأبعاد البوزونيـــة والأبعـــاد الفيرميونية. وماذا يعنى هذا بالضبط؟ حسناً فالتماثل يمثل مفهوم عدم التغيـــر مثـــل

كيف يبدو المربع إن هو أدير بزاوية ٩٠°. والبعد البوزونى هو واحد من الأبعاد المعتادة مثل الطول العرض (الأبعاد الستة الإضافية لنظرية الوتر هى بوزونية أيضًا ولكن هذا لا يهم الآن). وتخضع الأبعاد الفيرميونية لقواعد الجبر الظريفة التى شرحتها فى الفقرة السابقة. الدوران بين البعد البوزونى والبعد الفيرميونى يعنى أنه إذا كان هناك جسيم متحرك فى بعد بوزونى قبل الدوران فإنه بعد الدوران لا يكون كذلك. وأيضًا إذا لم يكن قبل الدوران كذلك فإنه بعد الدوران يكون كذلك. ومن الناحية الفيزيائية إذا بدأت ببوزون وأدرته إلى بعد فيرميونى فإنه يتحول إلى فيرميون. وإذا فكرت فى هذا الدوران عن طريق الرياضيات فإنك يجب أن تستبدل العدد ١ (الذى يمثل البعد البوزونى) بـ أ أو ب (الذى يمثل البعد الفيرميونى). وعندما نستخدم مفهوم عدم التغير فإن هذا يعنى أن الفيرميون الذى انتهيت به له نفس الكتلة والشحنة مثل البوزون الذى بدأت به. وهذا يؤدى بنا إلى أكثر توقعات التماثل الفائق إثارةً ألا وهو: لكل بوزون يوجد فيرميون بنفس الكتلة والشحنة والعكس بالعكس.

ونحن نعلم شيئًا واحدًا بالتأكيد أن العالم ليس متماثلاً فائقًا بالضبط. فإذا كان هناك بوزون بنفس الكتلة والشحنة مثل الإلكترون بالتأكيد كان لا بد أن نكون قد عرفنا هذا. فهو سيغير بالكامل تركيب الذرة. والذى يمكن أن يحدث أن التماثل الفائق ربما يكون منكسرًا بواسطة ميكانيزم شبيه بتكثف التاكيونات. وإذا كانت فكرة التماثل الجديد والغريب التى هى فى الحقيقة ليست بتماثل تجعلك تشعر أنه توجد حالة ضبابية فإننى لا ألومك. فالتماثل الفائق مثل كثير من أجزاء نظرية الوتر هو سلسلة طويلة من الأفكار دون اتصال وطيد بالفيزياء التجريبية.

وإذا كانت الأفكار الغريبة للتماثل الفائق والأبعاد الفيرميونية تولد باكتشافات داخل LHC فسيكون هذا انتصارًا للتفكير البحت فيما وراء أى شىء يحدث فى حياتنا. وعند كثير من الناس آمال معتمدة عليه. ولكن الآمال لا تحقق

الأشياء. فالتماثل الفائق إما أن يكون موجودًا بصورة تقريبية أو لا يكون موجــودًا. وبصراحة سأكون مبهورًا فى كلتا الحالتين.

نظرية كل شىء – ربما

وهذا مُختصر للأفكار القانونية عن كيفية وصــف نظريــة الــوتر للعــالم الحقيقى. تبدأ نظرية الوتر بعشرة أبعاد. وبالطبع فأنا أتحدث هنا عن نظرية الــوتر الفائق ولذا فإنه توجد أبعاد فيرميونية إضافية. ولكن دعنا نضعهما جانبًــا للحظـــة. وتلتف ستة من الأبعاد العشرة بطريقة معقدة أو بسيطة. وهناك طريقة مفضلة لهــذا وهى تستخدم البنية الرياضية للأوتار الفائقة مستخدمةً مميزات كــلٍ مــن التماثــل الفائق وبعض الخصائص الأخرى لصفيحة العالم. والأبعاد الملتفة تكــون صــغيرة ربما أكبر بضع مرات من الحجم النموذجى للوتر المهتز. وكل النغمــات التوافقيــة تكون ثقيلة جدًا بحيث لا تلعب أى دور أساسى فى الفيزياء المتاحة داخــل LHC. ومعظم المعلومات المهمة تأتى من النغمات التوافقية الأكثر انخفاضًا للوتر. وتوجــد أغشية D فى بعض النماذج أو الأنواع الأخرى من الأغشية خلال الأبعاد الإضافية مما يؤدى إلى ظهور حالات كمية إضافية للأوتار والتى من الممكن أن تكون مهمة لفيزياء LHC.

وبعد لف ستة أبعاد من الأبعاد العشرة لنظرية الوتر فما تريــد أن تعرفــه بالضبط هو فيزياء الأبعاد الأربعة المتبقية. توجد دائمًا جاذبية وعادة ما توجد أيضًا نظرية مقياس ليست بعيدة عن QCD. وتأتى الجاذبية من الحالات الوترية عديمــة الكتلة المنبسطة كميًا على الأبعاد الستة الإضافية. بينما تأتى نظرية المقياس إما من حالات الوتر المنبسطة المشابهة أو من حالات الوتر الإضافية المرافقة للأغشية.

والجاذبية فى الأبعاد الأربعة تعتبر موضوعًا عظيمًا وهو ما تصفه النسبية العامة. ولهذا فإن السؤال هل تُعتبر نظرية الوتر نظرية كل شيء يتحول إلى هل يمكن لنظرية المقياس التى نحصل عليها من لف الأبعاد الإضافية أن تؤدى إلى تنبؤات حقيقية حول الجسيمات دون الذرية؟ ولنفهم أكثر قليلاً حول نظرية المقياس فتذكر أولاً أننا وصفنا التماثل المقياسى لنظرية QCD بدلالة ثلاثة ألوان: أحمر، أخضر وأزرق. ولذا فإن المرشح الأمثل لوصف كل شيء (الكواركات - الجلونات - الإلكترونات - النيوترينوات وكل المتبقى) يجب أن يكون له على الأقل خمسة ألوان. وتستطيع بنية نظرية الوتر إمدادنا بتماثل مقياسى ذى خمسة ألوان بطرق طبيعية متعددة. ولم نر حتى الآن هذه الألوان الخمسة لأنه يوجد شيء يميز اثنين منهما عن الثلاثة الآخرين. ويمكن أن يشبه هذا الشيء بوزون هيجز ولكنَّ هناك أفكارًا أخرى كذلك. ولفهم لماذا خاصةً خمسة ألوان فلنتذكر أن الفيرميونات عبارة عن كواركات، إلكترونات، ونيوترينوهات. وتأتى الكواركات فى ثلاثة ألوان بينما الإلكترونات والنيوترينوات تأتى كل منهما فى لون واحد فقط. وبالتالى فإن ٣ + ١ + ١ = ٥.

وبالتالى فإن أفضل بنية للوتر يجب أن تُعطى فيزياء الطاقة المنخفضة وهو ما يشبه تمامًا ما رأيناه بالفعل فى تجارب فيزياء الجسيمات. مما يتطلب التماثل الفائق وليس فقط بوزون هيجز وحيد بل اثنين. وكذلك تتطلب أعدادا كبيرة من الجسيمات الأخرى ذات الكتل المقاربة لكتل بوزونات هيجز. وكذلك تفرض كتلة صغيرة جدًا للنيوترينو. وكذلك تشمل الجاذبية كما توصف بالنسبية العامة. ولكل هذه الأشياء فهى تعتبر نظرية مؤثرة جدًا: فبالتأكيد لا يوجد إطار نظرى آخر لفيزياء أساسية تمدنا بالمقومات الصحيحة مع الديناميكا الصحيحة. وإذا استطاع نظريو الوتر بأى طريقة ملائمة الحصول على البنية الصحيحة فلسوف تُصبح نظرية كل شيء: بمعنى أنها سوف تشمل كل الجسيمات الأساسية وكل التفاعلات التى تتعرض لها وكل التماثلات التى تخضع لها. ولن يتبقى أى شيء سوى حل

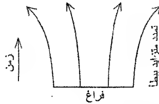
معادلات هذه النظرية والتنبؤ بكل الكميات الممكن قياسها فى فيزياء الجسيمات بدءًا من كتلة الإلكترون إلى قوة التفاعلات بين الجلونات.

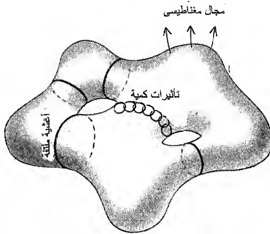
ومع ذلك فهناك بعض الصعوبات المتبقية. فيعتمد الكثير من التنبؤات على حجم وشكل الأبعاد الإضافية الستة فلا يوجد سبب نعرفه لماذا لا يمكن لهذه الأبعاد أن تكون مسطحة. وبمعنى آخر فلا نعرف أى ديناميكا ستجبرنا على العيش فى أربعة أبعاد بدلاً من عشرة. وإحدى الإمكانيات أن كل الأبعاد كانت ملفوفة بشدة فى الكون المبكر وأنه بسبب ما كان من السهولة لثلاثة أبعاد فقط منها أن تتسطح إلى الأبعاد المكانية لعالمنا. ولكن هذا لم يشرح بعد بأى تفصيل سبب حصول الأبعاد الإضافية على الشكل الذى تحوزه.والأسوأ من هذا لماذا تكون الأبعاد الإضافية متخبطة؟ ولفهم ما أعنيه بهذا دعونى أذكركم بمناقشة مجموعة من أغشية D0. فإن لها أيضًا قدرًا من التخبط بمعنى أن كل غشاء D0 كان مقيدًا بما يمنع انطلاقه بعيدًا عن المجموعة. وأغشية D0 خارج المجموعة لم تكن منجذبة أو متنافرة عن المجموعة. وتخبط الأبعاد الإضافية يعنى أنه يمكنها تغيير حجمها أو شكلها بسهولة كما يمكن لغشاء D0 أن يهرب من المجموعة.

وقد بُذل كثير من الجهد لإيجاد طرق لربط هذه الأبعاد الإضافية بحيث لا يمكنها التخبط بعد ذلك. والمقومات النموذجية هى الأغشية والمجالات المغناطيسية. ومن السهولة فهم دور الأغشية فإنها تشبه الحبل الذى تربطه حول الرزمة. لكن بافتراض أن الرزمة كانت ضخمة فسوف تحتاج إلى كثير من الحبال لمنع الرزمة من البروز بطريقة أو بأخرى. ويقوم المجال المغناطيسى بدور مشابه حيث يثبت الأبعاد الإضافية بطريقة ما.

والصورة التى وصلنا إليها أن الأبعاد الإضافية تكون معقدة. ومن المحتمل أنه توجد طرق كثيرة جدًا لربطها معًا لمنعها من التخبط. وهذه الإمكانيات الوفيرة تُعتبر أحيانًا شيئًا جيدًا بسبب وجود مشكلة أُخرى تسمى مشكلة الثابت الكونى.

فباختصار إذا كان هناك ثابت كونى فإن الأبعاد الثلاثة للزمكان لديها نزعة تتبؤ خلال الزمن.





منظر العالم طبقًا لنظرية الوتر. الأبعاد الأربعة المعتادة (أعلى لها نيـة بسيطة للتمرد. والأبعاد الستة الإضافية (أسفل) يجب أن تكون مربوطـة بأغشية ملتفة وأشياء أخرى مما يمنعها من التحطم أو تغير شكلها

ونحن نرى فى المشاهدات الفلكية أن معظم المجرات تتحرك بعيدًا عنا. ويُفسر هذا بأنه تمدد للمكان ذاته. وما سيفعله الثابت الكونى أنه سيسبب إسراع التمدد. وفى الحقيقة فإن المشاهدات خلال السنوات العشر الأخيرة تبدو أنها تدل على أن تمدد الكون يتعاجل بطريقة متفقة (حتى الآن) مع وجود ثابت كونى صغير

جدًا. وإذا أردنا أن نصف العالم باستخدام نظرية الوتر يبدو أننا نحتاج إلى ربط الأبعاد الستة الإضافية بحيث لا يمكنها التحرك على الإطلاق لكن نترك الأبعاد الثلاثة المعتادة بنزعتها البسيطة إلى التمدد وإلى تعجيل تمددها. ومن الصعوبة أن نصف كيف يمكن عمل هذا بالضبط. لكن يبدو أن عدد الطرق لتقييد هذه الأبعاد الإضافية ضخم جدا. لكن طبقًا لبعض فيزيائيى الوتر مع وجود هذا العدد الضخم من الإمكانيات يجب أن يوجد على الأقل عدد قليل من الإمكانيات حيث يمكن لكل شيء أن يعمل بصورة صحيحة حيث يتحدد الثابت الكونى فى حيز صغير مقبـــول. وكوننا هو واحد حيث تكون الأبعاد الإضافية مقيدة بالطريقة الصحيحة. وإن لم تكن هكذا فإن الحياة العاقلة ربما ستكون مستحيلة. وبالتالى فلم نكن لنوجد. ولهذا فإن وجودنا يتضمن أن كوننا الذى نعيش فيه له ثابت كونى صغير. وبالرغم من هذا فأنا أجد نفسى غير مقتنع أن هذه الطريقة من التفكير مفيدة فى نظرية الوتر.

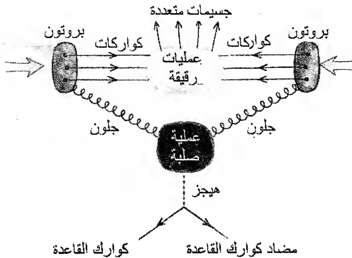
لقد ركز نظريو الوتر فى السؤال عن كيفية ضبط نظرية كل شيء لمدة أكثر من عشرين عامًا. وكانت لف الأبعاد الإضافية دائمًا ما تلعب دورًا. وكلمـــا تعلمنا أكثر عن نظرية الوتر زادت الإمكانيات أكثر. إنها دائمًا مُربكة. وربما من الأفضل مقارنة الصعاب للحصول على نظرية فيزيائية ذات أربعة أبعاد كناتج لنظرية الوتر بالمشكلة الدائمة فى اتجاه آخر من الفيزياء النظرية: الموصلية الفائقة ذات الحرارة العالية. فمنذ اكتشافها فى عام ١٩٨٦ فإن الموصلات الفائقة ذات الحرارة العالية تضخ كمية كبيرة من الكهرباء دون فقد مذكور للطاقة. ربما كلمة ذات حرارة عالية تعتبر مبالغة: فدرجة الحرارة فى هذا الموضوع مقاربة لدرجة تجمد الهواء. ولكن هذا يعتبـــر أسخن بكثير من الموصلات الفائقة السابقة ولها بالفعل بعض التطبيقات الصناعية المهمة. ومن الناحية النظرية فإن الصعوبة البالغة هى أن نفهم كيف تعمل الموصلية الفائقة ذات الحرارة العالية. وهناك نظرية منذ عام ١٩٥٠ تشرح الموصلية الفائقة المعتادة. وهى معتمدة على ربط زوج من الإلكترونـــات معًا. والقوة التى تربطهمـــا معًا معتمدة على الصوت. وتعتبـــر أن

الإلكترونات تستمع لبعضها البعض على مسافات تقدر بأضعاف حجم الذرة ومن ثم تنسق حركتها حتى تتجنب فقد الطاقة. شيء ساحر ولكنه أيضا سريع الزوال. فكثرة الحركات الحرارية تمنع هذا الازدواج من الحدوث: كما لو أن الإلكترونات لا تسمع بعضها البعض تسبب ضجيج الضوضاء الحرارية. ويُعتقد أنه لا يوجد أى قدر من المهارة فى التفسير الخاص بعام ١٩٥٠ حيث تضبط الإلكترونات حركتها خلال موجات صوتية يمكن أن يسبب هذه الخصائص المذهلة للموصلات الفائقة ذات الحرارة العالية. ومن المحتمل أن الإلكترونات تتزاوج فى هذه المواد لكن على مسافة أقصر بكثير بطريقة أكثر قوة. ويبدو أنها تستخدم ميزة خواص الوسط المحيط بها لتتزاوج. وتوجد بعض الأفكار النظرية عن كيفية حدوث ذلك ولكنى لا أعتقد أن المشكلة قد حُلت. وسواء حُلت أو لم تُحل فإن الموصلية الفائقة ذات الحرارة العالية يمكنها تقديم بعض الدروس لنظرية الوتر. والدرس الرئيسى أن السبب المجرد نادرًا ما يكون كافيًا.فإن الموصلات الفائقة ذات الحرارة العالية كانت اكتشافًا عمليًا وحاولت النظرية منذ اكتشافها أن تلحق بها. والنظرية الحقيقية للعالم ربما تكون مختلفة تمامًا عما يمكننا الآن تخيله.فإن الازدواج الضعيف للإلكترونات خلال الموجات الصوتية يذكرنى بتخبط الأبعاد الإضافية: مجرد تماسك ضعيف معا. ومن الممكن أن تكون الطريقة التى ترتبط بها نظرية الوتر بالعالم مختلفة عن مجرد مجموعة من الأغشية المقيدة، مجالات مغناطيسية، وأبعاد إضافية مثلما يكون التفسير الحديث للموصلية الفائقة بعيدًا عن نظريات عام ١٩٥٠. وربما تمر فترة طويلة لإيضاح هذا.

جسيمات وجسيمات وجسيمات

قد ألمحت فى الفصل الخامس باختصار إلى القائمة الطويلة للجسيمات الأساسية المعروفة: الفوتونات، الجرافيتونات، الإلكترونات، الكواركات (ستة

أنواع)، الجلونات، النيوترينوات، وبعض الجسيمات الأخرى. ولن يـضيف كثيـرًا شرح هذه القائمة الطويلة فهى تشمل عدة جسيمات مختلفة ولكل منهـا خصائـصها وتفاعلاتها المميزة.وتوجد قائمة طويلة لنظرية التوحيد لجسيمات أساسية أقل ولكـن بمستوى أعمق من القدرة التفسيرية. فقد حصل الجدول الـدورى الكيميـائى علـى معاملة توحيد خلال النظرية الذرية. فالهيليوم والأرجون والبوتاسيوم والنحاس كلها عناصر مختلفة طبقًا لتفاعلاتها الكيميائية. لكن كشفت النظرية الذرية عـن تكونهـا من إلكترونات فى حالات كمية من التذبذبات حول نواة ذرية مكونة من بروتونـات ونيوترونات. والقائمة الطويلة للجسيمات الأساسية ربما تحصل هى الأخرى علـى معاملة توحيد بدلالة نظرية الوتر. وبالنسبة للقائمة الطويلة للأشـياء فـى نظريـة الوتر: أغشية د، أغشية 5 السوليتونية، أغشية *M*، وهكذا. فلا أحد يعرف كيـف أو هل يتم توحيدها فى مستوى أعلى من ثنائيات الوتر؟



تصادم البروتون – بروتون داخل (LHC) يمكن أن ينتج بوزون هيجـز كما هو مبين. ويمكن لجسيم الهيجز أن يتحلل لكواركات القاعدة ومضاد كواركات القاعدة التى يمكن أن تكتشف. ولكن الجسيمات المتعدة يمكن أن تمثل عدم دقة لما يحدث حقيقة.

وأثقل الجسيمات المكتشفة حتى الآن هو كوارك القمة فكتلته نحو ١٨٢ مرة من كتلة البروتون وقد تم اكتشافه عام ١٩٩٥ فى التيفاترون وهو أول معجل جسيمات أُنشئ فى الولايات المتحدة. وقد تم تدوير البروتون ومضاد البروتون خلال مسافة ضخمة (نحو ٣، ٦ كيلو مترات) ثم اصطدما ببعضهما. وعند اصطدامهما كان لكل منهما طاقة تكافئ ألف مرة كتلة سكونهما. وليس من الغريب إنتاج كوارك القمة عند هذا التصادم: فتوجد وفرة من الطاقة المتاحة. وفى الحقيقة توجد طاقة لخلق جسيم عشرة أضعاف كتلة كوارك القمة: ١٠٠٠ + ١٠٠٠ = ٢٠٠٠ كتلة بروتون. ولسوء الحظ فإنه من المستحيل لكل هذه الطاقة أن تذهب إلى جسيم واحد وهذا بسبب أن البروتون ومضادات البروتون لهما تركيب داخلى. فكل منهما يحوى ثلاثة كواركات وبعض الجلونات. فعندما يصطدم بروتون مع مضاد بروتون فمعظم الكواركات والجلونات لا تتقابل. ولكن الموقف يختلف عندمـــا يصطدم كوارك أو جلون من البروتون بشدة مع آخر من مضاد البروتون. فمثل هذا التصادم القـــوى (ويوصف غالبًا بالعملية الصلبة) هو ما يخلق كوارك القمة داخل التيفاترون. ويمكن للعمليات الصلبة أيضًا أن تخلق جسيمات هيجز إذا كانت موجودة. وبسبب أن العمليات الصلبة تشمل واحدًا فقط من الكواركات أو الجلونات من البروتون وواحدًا فقط من مضاد البروتون فإن الطاقة المتاحة لخلق كوارك القمة تمثل كسرًا ضئيلاً من الطاقة الكلية للتصادم. بينما داخل **LHC** سوف يتصادم زوج من البروتونات بطاقة كلية نحو ١٥ ألف مرة كتلة البروتون. والطاقة المتاحة فى العملية الصلبة ربما تكون عُشر هذه الطاقة. وأحيانًا أكثر وأحيانًا أقل. وبالتحدث بلغة الأرقام المقربة فمن المتوقع أن **LHC** سوف ينتج جسيمات بوفرة بكتلة سكون حتى ١٠٠٠ مرة كتلة البروتون. وينبغى أيضًا أن تنتج جسيمات أثقل ربما حتى ٢٠٠٠ مرة من كتلة البروتون.

لكن كلما كان الجسيم ثقيلاً كان إنتاجه أندر بسبب صعوبة احتواء العمليـــة الصلبة على الطاقة اللازمة لإنتاجه.

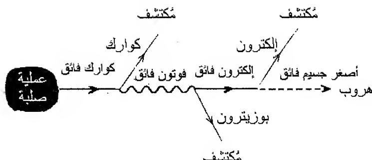
لكن ما نوع هذه الجسيمات التى من المتوقع أن يكتشفها LHC؟ فى أثناء كتابتى لهذا الكتاب فإن الإجابة الأمينة هى: نحن لسنا متأكدين. لكن ينبغى أن يكون هناك شىء ما. لست أعنى بهذا أن LHC سيكون تضييعًا كبيرًا للمال إذا لم يُكتشف أى شىء (بالرغم من أن هذا حقيقى). ولكن ما أعنيه هو أنه بصرف النظر عن أفكار التماثل الفائق أو نظرية الوتر يوجد شىء مختبئ داخل مجال الطاقة وهذا ما سوف يكتشفه LHC. ربما تكون فقط جسيمات هيجز. والأكثر ترجيحًا أنها بوزونات هيجز بالإضافة إلى بعض الجسيمات الأخرى. وإذا كنا محظوظين فستكون جسيمات التناظر الفائق.والدليل على أنه ينبغى أن يكون هناك شىء يعتمد على إعادة الاستنظام. وقد أعطيت وصفًا مختصرًا لها فى الفصل الرابع. لكن لنذكركم: هى الآلية الرياضية التى تسمح لنا باقتفاء أثر سحابة الجسيمات الافتراضية التى تحيط بإلكترون أو بأية جسيمات. وتعمل هذه الآلية فقط إذا كان هناك شىء مثل بوزونات هيجز فى مجال الطاقة الذى سيكتشفه LHC. ولكى تعمل برفق ينبغى أيضًا أن يكون هناك شىء مثل التماثل الفائق بالإضافة إلى الهيجز. ولكن دعنا لا ننسى أن آلياتنا الرياضية ليست هى العالم. فمن الممكن أن يكون هناك خطأ فربما يوجد شىء لم نتخيله موجودًا فى LHC. وهذا سوف يكون أكثر الإمكانيات إثارة. وبالرغم من كل توقعاتنا المنطقية فربما لا يوجد شىء نراه.

دعنا نعود إلى التماثل الفائق وهو المرشح المفضل لوصف فيزياء LHC. فكما شرحت سابقًا فإن التوقع المهم للتماثل الفائق أنه لكل جسيم نعرفه يوجد جسيم جديد بنفس الكتلة والشحنة. وأساسًا بالتفاعلات نفسها مع اختلاف اللف. فنحن نعرف الإلكترون ويتنبأ التماثل الفائق بما يسمى الإلكترون الفائق. ونحن نعرف الفوتون ويتنبأ التماثل الفائق بما يسمى الفوتون الفائق. وبالطريقة نفسها فإن التماثل الفائق يتنبأ بكوارك فائق، جلون فائق، نيوترينو فائق، جرافيتون فائق. حتى جسيمات هيجز ينبغى أن يكون لها رفيق فائق. وكما شرحت سابقًا فإن التماثل الفائق لا يمكن أن يكون صحيحًا تمامًا: فمثلاً نحن لا نعلم بوجود إلكترون فائق

بنفس كتلة الإلكترون ولكن التماثل الفائق التقريبي ربما يتنبأ أنــه يوجــد إلكتــرون فائق، فوتون فائق ونيوترون فائق وكل الباقي ولكن كتلتها يمكــن أن تكــون أكبــر بكثير من الجسيمات التي اكتشفناها حتى الآن. ومن المنتظر أن نفترض أن معظــم أو كل هذه الجسيمات الفائقة لها كتل ضمن متناول LHC. فإذا كان هــذا صــحيحًا فإن LHC يمكن أن يكون أكثر آلات الاكتشافات المثمرة في التاريخ.

إن التماثل الذي يتطلب مجموعة من الجسيمات الجديــدة حتمًــا مــع كــل الجسيمات الموجودة حاليًا والمعروفة ربما يبدو خطوة للخلف وليس للأمام. ألــيس من المفترض أن نصل إلى صورة موحدة بقدرة أكبر على الفهم بدلالــة مكونــات أقل؟ هذا بالضبط ما أشعر به تجاه التماثل الفائق عندما علمت به أول مرة. ولكــن هناك مقارنة جديرة بالتفكير. فمعادلة الإلكترون المكتشفة عام ١٩٢٠ أدت إلى تنبؤ غير متوقع إطلاقًا: وجود مضاد الإلكتــرون والمــسمى بــوزيترون. وقــد تنبــأ الفيزيائيون بمضاد لكل جُسيم يعرفونه وقد وجدوها بالفعل. وبالنسبة لي فإن التماثل الفائق ليس له تلك الحتمية. فلسنا محتاجين له كي نصف الجسيمات التــي نعرفهــا كما كانت معادلة الإلكترون مُحتاجة لها. وليس مــن العــدل مقارنــة البــصيرة أو الإدراك السابق بالإدراك المؤخر.

وهناك مفهومان أحدهما أن يوجد جسيم بكتلة في المدى الصحيح في LHC ليوجد والآخر أن يتم اكتشافه بالفعل. هذا بسبب أنه من الأمور المعقــدة أن نبحــث عن تصادم ونعيد نمذجة ما حدث. فمن الممكن حقًا أن يكون التيفاترون قــد أنــتج بوزونات هيجز لأعوام.وإعادة نمذجتها تتطلب شيئًا من حدة الذهن مما أدى فعليًــا لعدم ملاحظتها. وفي الحقيقة فإن الفيزيائيين يمنحون مجالاً لبوزونات هيجز ليــست أكثر من ١٥٠ مرة من كتلة البروتون: أي أنها أخف من كوارك القمة. ويمكــن أن تكون الجسيمات الفائقة أسهل في اكتشافها في LHC من الهيجز. وعلــى الأخــص فالجلونات الفائقة ينبغي أن تُنتج بوفرة إذا كانت في نطاق الكتلة المسموح بها. ومن المهم أيضًا توقع وجودها من خلال عدة نظريات في التماثل الفائق خــلال سلــسلة من التحلل التي من السهولة ملاحظتها خلال بيانات.



تحلل كوارك فائق إلى عدة جسيمات مُكتشفة وأصغر جسيم فائق الذى يمكن أن يمر دون اكتشاف.

وخلال هذه السلسلة من التحللات فإن الجلونات الفائقة تفقد جزءًا من طاقة السكون بالتحول إلى نوع آخر من الجسيمات الفائقة. ثم يفقد هذا الجسيم الفائق الجديد بعضًا من طاقته بالطريقة نفسها. وبعد عدة خطوات نصل إلى أصغر جسيم فائق. ومن المفترض غالبًا أن هذا الجسيم لن يتحلل على الإطلاق. لكن بدلاً من هذا فإنه سوف يهرب دون أن يُكشف. وإذا كان هذا صحيحًا فإن الكشافات داخل **LHC** لن تلاحظ الجسيمات الفائقة لكن ستلاحظ الجسيمات التى ظهرت خلال التحلل إلى أصغر جسيم فائق.

وقبل إخباركم أكثر عن هذا الجسيم ينبغى أن أذكر واحدة من الحقائق غير السارة بالنسبة **LHC**: حتى إذا اكتشفت أشياء تشبه جسيمات فائقة فسوف يكون من الصعب أن نعتبر هذا دليلاً غير مشكوك فيه بالنسبة للتماثل الفائق. وهذا أساسًا بسبب أن تصادمات البروتون – بروتون غير مرتبة فكثير من الجسيمات تُنتج. والتفاعلات المعروفة بين الكواركات والجلونات قوية جدًا بحيث يمكنها إخفاء ظواهر جديدة. ومن الصعوبة تحديد اللف للجسيمات الجديدة المكتشفة. ولكل هذه الأسباب فإن الفيزيائيين أيدوا بناء ماكينة مرافقة لـ **LHC** تُسمى المصادم الخطى

العالمى أو ILC. وسوف يُصادم الإلكترونات مع البوزيترونات وسوف تُنتج هذه التصادمات نواتج تجريبية أوضح. ومن الممكن أن نميز بوضوح أكثر من LHC بين التماثل الفائق والنظريات الأخرى. ولكن ILC لا يزال مجرد اقتراح. والنهاية المظلمة للمصادم الفائق ذى الموصلية الفائقة تُظهر صعوبة تحويل المقترحات إلى واقع فعلى.

دعنا نعود إلى التماثل الفائق. فإذا كان أصغر جسيم فائق موجودًا فسيكون أكثر الاكتشافات أهمية على الإطلاق. لأنه ربما يكون المادة المظلمة التى تجذب المجرات معًا. ولعشرات السنين، فقد كان علماء الكونيات والفلكيون متشككين بالنسبة للكتلة الكلية للمجرات. فيمكنهم عد النجوم داخل إحدى المجراتُ (على الأقل تقريبًا). وعن طريق هذا الحساب يمكنهم التنبؤ بكمية المادة العادية الموجودة بالمجرة. وما أقصده بالمادة العادية هو أساسًا البروتونات والنيوترونات لأنهما حاملا الكتلة الأساسيان. والمشكلة أن المجرات لا يبدو أنها تحتوى على كتلة كافية من المادة العادية حتى تتماسك معًا بالطريقة الحالية. ولهذا ظهرت فرضية المادة المظلمة: توجد مادة إضافية لا نراها بالمجرات وهى مسئولة أساسًا عن تجاذب المجرات معًا فى المقام الأول. وبالاعتماد على مجموعة من القياسات المختلفة فيعتقد كثير من أو معظم علماء الكونيات أنه توجد مادة مظلمة فى الكون تعادل من خمس إلى ست مرات كمية المادة العادية. لكن ما هذه المادة المظلمة؟ لقد ظهرت اقتراحات متعددة بدءًا من النجوم المحترقة إلى الجسيمات دون الذرية. واعتبار أصغر جسيم فائق كمادة مظلمة له ميزتان أساسيتان. أولاً فى كثير من نظريات التماثل الفائق الواقعية تكون الجسيمات ذات كتلة كبيرة جدًا (أكبر من مائة مرة من كتلة البروتون) ومتعادلة كهربائية وثابتة فما معنى أنها تتحلل إلى جسيمات أُخرى؟ ثانيًا من السهولة فهم كيف تكونت فى الكون المبكر بالوفرة الصحيحة التى تساوى تقريبًا من خمس إلى ست مرات من المادة العادية.

وبالإجمال فإن التماثل الفائق إطار نظرى رائع ويــتم التعامــل بــه خــلال رياضيات غريبة. وهو متفق بطريقة جميلة مع نظرية الجسيمات الراســخة التــى تحوى إعادة الاستنظام. وهى تتنبأ بكثير من الجسيمات التى نأمــل أن نراهــا فــى LHC. وفى النهاية فإن التماثل الفائق ونظرية الوتر مرتبطان بعمق. بحيث إنه من الصعوبة بالنسبة لى أن أعتقد أنه يمكن للمرء أن يجد التماثل الفائق فــى العــالم إلا إذا كانت نظرية الوتر صحيحة فى بعض صورها. دعنى أضــع هــذا بالطريقــة الآتية: التماثل الفائق يشبه ثنائيات الوتر فهو يربط الجسيمات بــالجسيمات الفائقــة كما تربط ثنائية S الأوتار بأغشية D. ومثل ثنائية الوتر فإنها تتركك وأنت تطلــب المزيد. ألا توجد صورة موحدة تشمل كل الجسيمات والجسيمات الفائقة؟ ألا يمكــن أن يكون التماثل الفائق ذاته تلميحًا بما يجب أن تكــون عليــه صــورة التوحيــد؟ وتعطينا نظرية الوتر إجابة واضحة وهى من أين بدأ التماثل الفائق من البداية ومن أين كان لكل الجسيمات التى نعرفها أو سيتم اكتشافها أصل موحد بدلالــة ديناميكــا الوتر والأبعاد الإضافية؟

الفصل الثامن

الأيونات الثقيلة والبعد الخامس

هناك حقيقة غريبة عن العلاقة بين التماثل الفائق وفيزياء LHC وهـــى أن المقومات الأساسية كانت موجودة تقريبًا منذ عشرين عامًا أو أكثر. وقد تم بالتأكيـــد تحديث هذه المقومات فى العقدين الماضيين. سواء كان نظريًـــا أو عمليًـــا. وكـــان اكتشاف كوارك القمة اكتشافا عظيمًا بالرغم من توقع وجوده من مدة طويلة. بينمـــا أدى عدم اكتشاف جسيمات هيجز إلى تقييد نماذج التماثل الفائق بطرق شائقة. وقـــد تعمق الفهم النظرى للتماثل الفائق بقدر كبير إضافة إلى أن مجال الإظهار الممكـــن للتماثل الفائق فى LHC قد تم سبره بطريقة أفضل عما كان فى أواخر الثمانينيات. ولكن هذا التقدم بطريقة ما مجرد زيادة كمية. لكن الآن مـــع بدايـــة عمـــل LHC وظهور بياناته فإن المرء لديه الإحساس بأن المجال بكامله يمسك أنفاسه. ولكنه فى الحقيقة كتم أنفاسه لمدة طويلة. ويُعتبر التماثل الفائق مـــن الموضـــوعات المبهجـــة لدرجة أنه ظل لمدة عقود دون اكتشاف أى جسيمات دون أن يفقد مكانتـــه ليـــصبح الأمل الرئيسى. وقد تمت معايرة النظريات البديلة بالمقارنة بالتماثل الفائق لدرجـــة أنها بدأت تشابه التماثل الفائق.

ومؤخرًا قد تم تطوير طرق مختلفة تمامًا لـــربط نظريـــة الـــوتر بالعـــالم الحقيقى. ومن جانب نظرية الوتر فهو يؤسس على ثنائية المقيـــاس– الـــوتر التـــى قدمتها فى الفصل السادس. وفى جانب العالم الحقيقى. فهـــو يـــرتبط بتـــصادمات الأيونات الثقيلة التى سأشرحها أكثر فى الفقرة التالية. وفى مثل تلـــك التـــصادمات فإن درجة الحرارة والكثافة ترتفعان عاليًا جدًا حتى إن البروتونات والنيوترونـــات

تتصهران فى سائل يُسمى بلازما الكوارك – جلون أوب ك جــ اختصارًا. وهنــاك طرق لفهم هذا السائل دون أى علاقة مع نظريــة الــوتر. والطريقــة الـصحيحة لتشخيص هدف هذا المجال هى جعل نظرية الوتر واحــدةً مــن الطــرق المفيــدة المتعددة لوصف بلازما الكوارك ــ جلون.

وهذا يوضح هدفًا أقل شموخا لتقديم نظريةٌ كل شــىء وإظهــار التركيــب الجوهرى للكون الفيزيائى. لكن فى الوقت الحالى فإن الصلة المفترضة بين نظرية الوتر وفيزياء الأيونات الثقيلة لها ميزتان ساحرتان ولم تكونا موجودتين من جانــب نظرية كل شىء بالنسبة لنظرية الوتر. أولاً الجانب الفكرى من وجهة نظرية الوتر له جذور قوية بدلالة ديناميكا الوتر وثنائية المقياس – الوتر. وهــذا يُعتبــر أكثــر مباشرةً للدخول لنظرية الوتر نفسها أكثر مما تقدمه سيناريوهات نظرية كل شــىء. وهذا بسبب أن الصلات بين نظرية الوتر وفيزياء LHC تتم خلال التماثــل الفــائق ومجال الطاقة المنخفضة لنظرية الوتر حيث تنهار كل حالات الوتر خارج الفيزياء عدا أخفها. ثانيًا قد تمت مقارنة حسابات نظرية الوتر بالبيانات التجريبية مع قــدر من النجاح. لكن يجب توخى الحظر ولا تزال هناك اختلافات عن كيفية وإمكانيــة ارتباط نظرية الوتر بتصادمات الأيونات الثقيلة. ومع هذا فإن هذا المجــال يمثــل أقرب اتصال بالبيانات بين نظرية الوتر الحديثة والفيزياء التجريبية.

أسخن بقعة على وجه الأرض

يقع مصادم الأيونات الثقيلة النسبية RHIC وهو مُسرع جسيمات فى لــونج أيلاند ليس بعيدًا عن مدينة نيويورك. ويشابه تصميمه الأساسى التيفاترون وLHC. ويُعتبر ضعيفًا نسبيًا: فيستطيع أن يُسرّع الجسيمات دون النووية لطاقة نحــو مائــة

ضعف كتلة سكونها فقط، بينما يصل التيفاترون إلى نحو ألف مرة. وLHC سوف يصل إلى ٧٠٠٠ مرة بالنسبة للبروتونات. والفرق الكبير بين التيفاترون وRHIC أن RHIC يسرع نوى الذهب. ويوجد نحو ٢٠٠ من النيوكلونات داخل نواة الذهب (النيوكلون هو بروتون أو نيوترون). وقد تم اختيار الذهب لأن نواته كبيرة ولأسباب فنية مرتبطة بكيفية بدء تسريعها. وعندما يُصادم LHC أيونات ثقيلة فإن الخطة أن يُستخدم الرصاص والذى له نواة أكبر قليلاً من الذهب. ولا يوجد شيء خاص بالنسبة للذهب من وجهة نظر تصادمات الأيونات الثقيلة.

وقد اعتاد فيزيائيو الجسيمات أن يصدموا أى شيء بآخر إذا كان من الممكن أن يتعلموا أى شيء من هذا التصادم. ولكن الاختيار السابق كان يميل نحو الإلكترونات والبوزيترونات. وهنا كسبب جيد لهذا الاختيار: فالإلكترونات والبوزيترونات صغيرة وبسيطة بالمقارنة بالنوى الذرية. وليس هناك دليل لكون الإلكترون أى شيء إلا أنه جسيم نُقطى والبوزيترونات مثل الإلكترونات تمامًا لكن فقط بشحنة موجبة. بينما تُعد البروتونات أكثر تعقيدًا بكثير فهى تحوى على الأقل ثلاثة كواركات وربما بعض الجلونات. وإجمالاً فإن مكونات البروتون (أو مكونات النيوترون) تُدعى بارتونات: وكل واحد هو جزيء من البروتون. ولكن البروتون ليس فقط مجموع البارتونات بداخله. وتُشبه التفاعلات القوية بين الكواركات والجلونات داخل البروتون سلسلة من الجسيمات التقديرية التى ناقشناها عند الحديث عن إعادة الاستنظام. دعونى أذكِّركم بما يعنى هذا، يشع الكوارك أحد الجلونات بالطريقة نفسها التى تشع بها الإلكترونات الفوتونات. فالجلون يُشابه هنا الفوتون لكن ليس بالكامل. والاختلاف الكبير أن الجلونات يمكن أن تنقسم إلى جلونات أُخرى ويمكنها أن تنقسم أيضًا إلى كواركات أو تتحد مع جلونات أُخرى. وكل هذه الانبعاثات والانقسامات والتجميعات هى ما نسميه بكلمة السلسلة وتُسمى الجسيمات تقديرية لأن كل شيء يحدث داخل البروتون. فلن يمكنك أبدًا رؤية

كوارك منفردًا أو جلون منفردًا: فهما دائمًا جزء من بروتون أو نيوترون أو بعض الجسيمات دون الذرية الأخرى. ويصف الفيزيائيون هذا بقولهم إن الكواركات والجلونات مُقيدة. وكل عمليات إفنائها أو إحيائها تحدث دائمًا داخل قيد البروتون.

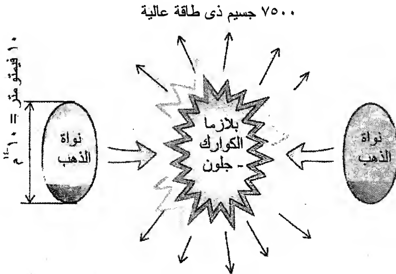
وعندما تصطدم البروتونات يمكن للمرء أن يفكر أن ما حدث هو أن كل واحدٍ منهما يعترض الآخر فى وسط سلسلته من الكواركات والجلونات. وأحد الأشياء الذى يمكن أن يحدث أن زوجًا من الكواركات يصطدم بشدة. وهذا هو نوع الأحداث الذى تتعلق به آمال LHC: عملية صلبة. ومعظم الذى يحدث أن الكواركات والجلونات تتفاعل أكثر رقةً. وتُعتبر كلمة رقة نسبية. فإن البروتونات المتصادمة تتحطم تمامًا عند الاصطدام. وأكثر من خمسين جُسيمًا تنتج من هذا التصادم ومعظمها غير ثابتة.

ولنشعر كيف تتم هذه التصادمات تخيل عربة تصدم عربة أُخرى بالمواجهة. ودعنا نفترض أنه لا يوجد مسافرون بالعربات فهو مجرد اصطدام عربات بها دُمى. لنتخيل العربات تُماثل البروتونات المتصادمة والدمى تُماثل الكواركات داخل كل بروتون. فى الظروف المفضلة فإن الذى يحدث أن الدمى يُلحق بها ضرر بسيط حتى عندما تتداخل العربات بالكامل. وهذا يماثل قولنا إن الكواركات داخل أحد البروتونات تتفاعل برقة مع البارتونات فى البروتون الآخر. وفى الحالات غير المفضلة فإن الذى يمكن أن يحدث هو أن تُشوه الدمى بطريقة عنيفة بجزءٍ من العربة الأخرى المقابلة. وهذا يماثل التصادم الصلب. وتصادم البروتون- بروتون هو دائما خليط من العمليات الصلبة القليلة بالإضافة إلى كثير من العمليات الرقيقة التى تحدث حولها.

دعونى أخبركم أنه لا يوجد شىء ضار من تصادمات الطاقة العالية للجسيمات دون الذرية. ففى الحقيقة تحدث دائمًا فى الغلاف الجوى للأرض حيث

تسقط علينا جسيمات ذات طاقة عالية وتضرب بعـــض النيوكلونـــات أو جـــسيمات أُخرى فى الهواء. وما يجرى فى التيفاترون وما سوف يجرى فى **LHC** هو مجرد نسخة محكومة لشيء يحدث دائمًا منذ بدء العالم. وبسبب حدوث عدة تصادمات فى المكان نفسه داخل مسرِّع الجسيمات فإن محيط التصادمات يكون معـــزولاً تحـــت الأرض. وسوف يكون هناك كثير من الإشعاع الخطر لأى شخص موجود هنـــاك. لكن بالمقارنة بالمفاعلات النووية أو الأسلحة الذرية فإن الخطورة أقل.

وتُشبه تصادمات أنوية الذهب تصادمات بروتون – بروتـــون لأول وهلـــة. وتشمل كل نواة مجموعة من النيوكلونات ولكل منها تركيب داخلى من البارتونات. وربما يصدم بعض البارتونات البعض الآخر بشدة أثناء التصادم بينما يدفع الغالبيـــة البعض الآخر برفق. وكما فى حالة تصادمات بروتون – بروتون فإن نوى الـــذهب تتحطم تمامًا وببساطة فإن آلاف الجسيمات تتفرق من تصادم أنوية الذهب.



تصادم سريع جدًا بين أنوية الذهب يمكن أن يخلق بلازمـــا الكـــوارك – جلون التى تحلل إلى آلاف الجسيمات ذات الطاقة العالية.

وهناك شيء أكثر مأساوية من الناحية الكيفية بالنسبة لتصادمات أنوية الذهب عن تصادمات البروتونات. ولوصف هذا دعني أعود لتشابه تصادم العربات. فمن أسوأ الأشياء التى يُمكن أن تحدث أن أحدًا أو كلا خزاني الوقود يشتعل وينفجر. وقد بذل صُناع العربات مجهودا ضخمًا لمنع هذا عن طريق وضع الخزان مثلاً فى مكان بأقل احتمال أن يُثقب. وما يحدث فى حالة تصادم أنوية الذهب شبيه بانفجار خزانات الوقود سريعًا بعد تصادم العربات. وهذا يبدو ببساطة ككرة حرارية من النار النووية التى تتكون ثم تنفجر. هذه الكرة هى أسخن من أى شيء يمكن تُخيله. فإن انفجار خزان الوقود يصل إلى ٢٠٠٠ كلفن ومركز الشمس نحو ١٦ مليون كلفن. والآن فإن الحرارة التى يمكن الحصول عليها داخل RHIC أكثر من ٢٠٠٠٠٠ مرة أسخن من مركز الشمس. وهذا يتطلب بعض التفكير. ويتم انصهار البروتونات والنيوترونات داخل هذه الحرارة مما يؤدى إلى تحرر الكواركات والجلونات بداخلها. وهذا ما يؤدى إلى تكون بلازما الكوارك – جلون أو ب ك ج التى ذكرتها سابقًا فى هذا الفصل.

وأثناء تصادمات بروتون – بروتون فإن العمليات الصلبة التى سيمحصها فيزيائيو LHC للبحث عن علامات لبوزون هيجز والتماثل الفائق ستكون مبهمة بالعمليات الرقيقة التى تحدث أثناء التصادم نفسه. لكن لننتظر قليلاً فعندما يتصادم كواركان بشدة فإنهما يرتدان فى اتجاهات جديدة بالكامل وينتقلان نحو مكتشفات الجسيمات المحيطة بهما دون أن يعترضهما باقى البروتون. لكن فى تصادمات الأيونات الثقيلة فإن العكس يحدث: فالعمليات الصلبة هى التى تحدث لكن فى معظم الوقت فإن الجسيمات الناتجة تلتصق ببلازما الكوارك – جلون. ومدى حدوث هذا هو واحد من خصائص بلازما الكوارك – جلون. وإطلاق الرصاصات إلى الماء يُعطى مثالاً مشابهًا لذلك. وربما قد رأيت بعض الأفلام حيث يقوم جيمس بوند أو شخصية مشابهة بإطلاق الرصاص تحت الماء وتطير الطلقات محدثة أزيزًا حوله. يمكنك أن ترى هذا الأثر الفقاعى مضيئًا بشكل طريف. والحقيقة أن الطلقة سوف

تخترق الماء لعدة أقدام. وبالمصطلحات الفيزيائية فإن الطلقات فى الماء لها طول توقف يكافئ عدة أقدام. وواحدة من الخصائص المميزة لبلازما الكوارك – جلوّن أن لها طول توقف قصيرًا جدًا للجسيمات الآتية من العمليات الصلبة. فقط عدة أضعاف حجم البروتون.

والخاصية الثانية المميزة لبلازما الكوارك – جلون هى لزوجتها. وباعتبار الكثافة العالية جدًا لـ ب ك جـ فإن لزوجتها صغيرة بطريقة مدهشة. وهذا يحتاج بعض الشرح لنفهم ماذا يعنى هذا؟ من أحد الجوانب فإنى أعتقد أن اللزوجة هى مفهوم مألوف لمن يطبخ: فإن العسل والمربى هما مادتان لزجتان بينما الماء أقل لزوجة. ولكن التباين الذى نريد أن نلفت النظر إليه فى فيزياء الأيونات الثقيلة هو بين الجسيمات المتدفقة بحرية والمُعتبرة عالية اللزوجة وبين البلازما شديدة التفاعل التى ليست لزجة. وهذا ربما يبدو معكوسًا. لا شىء يمكن أن يكون أقل لزوجة من الجسيمات المتدفقة بحرية. حقًا ؟ إذا لم يصدم الجُسيم أى جُسيم آخر فلن تكون هناك لزوجة. صحيح؟ لسوء الحظ هذا خطأ بالكامل. فإن الأشياء التى لها لزوجة صغيرة جدًا يمكن أن تصنع طبقات تنزلق بعضها فوق البعض. والماء المتدفق فوق الصخور يصنع مثل ذلك: فطبقة الماء القريبة من الصخور تتحرك ببطء. ولكن الطبقات فوق الطبقة الأولى تنزلق سريعًا فوق الصخور كما لو كان تم تزييتها بطريقة ما عن طريق الطبقة القريبة من الصخور. ماذا لو قمنا بإحلال الماء بالبخار لكن تركنا الصخور كما هى؟ سيتم تقييد البخار: ربما نضع غطاءً فوق التيار ليحافظ على البخار. والبخار عبارة عن حزمة من جزيئات الماء المنفصلة التى نادرًا ما تصطدم ببعضها البعض. ولكنها تصطدم بالصخور. وبعكس الماء فإن البخار لا يكون طبقات منزلقة بسهولة فوق بعضها البعض. وحقيقةً فإنه من الصعوبة الحصول على كمية من البخار تتدفق خلال أنبوبة خشنة أكثر من أن تحصل على الكمية نفسها من الماء المتدفق خلال تلك الأنبوبة لأن الماء له تزييت ذاتى. وهذا هو معنى أن الماء له لزوجة أقل من البخار.

وتصادم الأيونات الثقيلة يخلق شروطًا مشابهةً لتيار الماء بين الصخور لكن دون صخور أو تيار. وما أعنيه أنه يمكنك أن تخبرنا بالفرق في تصادمات الأيونات الثقيلة بين المواد الشبيهة بالماء التي لها لزوجة منخفضة بمعنى قدرتها على التدفق بحرية عن طريق الطبقات المنزلقة والمواد المشابهة للبخار التي هي أساسًا عبارة عن مجموعة من الجسيمات التي نادرًا ما تصدم بعضها البعض. ومن الغريب أن أفضل فهم للبيانات يأتي بافتراض أن الجسيمات تسلك سلوك اللزوجة المنخفضة جدًا. والتقديرات النظرية للزوجة المعتمدة على الديناميكا اللونية الكمية تتنبأ بأن الكواركات والجلونات سوف تتصرف أقل مثل الماء وأكثر مثل البخار مما يفعلونه حقيقةً.

وقد تصدع عالم فيزياء الأيونات الثقيلة عندما تم اكتشاف أن آفاق الثقوب السوداء لها لزوجة مُقاربة للقيم الصغيرة التي يحتاجها المرء لفهم بيانات الأيونات الثقيلة. وتم هذا الاكتشاف داخل إطار ثنائية المقياس – الوتر الذي قمتُ بتقديمه في الفصل السادس. ويبدو أن التطورات اللاحقة تؤكد أن أوجهًا كثيرة من تصادمات الأيونات الثقيلة لها مشابهات قريبة في أنظمة الجاذبية. وأنظمة الجاذبية التي نعنيها تشمل دائمًا بعدًا إضافيًا وهو لا يشبه البعد الإضافي لنظرية الوتر. وهذا البعد الإضافي – هو ما أشرت إليه بالبعد الخامس في عنوان هذا الفصل– ليس ملفوفًا. بل هو متعامد على أبعادنا المعتادة ولا نستطيع التحرك إليه بالطريقة المعتادة. وما يصفه هو مقياس طاقة بمعنى الطاقة المميزة لعملية فيزيائية. وباتحاد البعد الخامس بالأبعاد التي نعرفها نحصل على زمكان منحنى ذى خمسة أبعاد. ويصف هذا الزمكان درجة الحرارة، وفقد الطاقة، واللزوجة بطرق هندسية. وقد تم بذل كثير من الجهد في عدد من السنوات الماضية لمعرفة تفصيلات التناظر التي يمكن عملها بين الهندسات ذات الأبعاد الخمسة وفيزياء بلازما الكوارك – جلون.

وباختصار: فإن التفاعلات الرقيقة التي يتمناها فيزيائيو LHC لم تكن موجودة في تصادمات البروتون– بروتون بينما كانت موجودة بكثرة في تفاعلات

الأيونات الثقيلة. وهى تؤدى إلى خلق بلازما الكوارك – جلـون. وب ك جـــ لا يمكن وصفها تمامًا بدلالة الجسيمات المنفردة. لكن خصائصها يمكن فهمها بطريقـة أفضل بدلالة الثقوب السوداء فى خمسة أبعاد طبقًا لثنائية المقياس – الوتر.

الثقوب السوداء فى البعد الخامس

قد أعطيتُ مقدمةً مختصرةً عن ثنائية المقياس – الوتر فى الفصل السادس. دعنى أُلخص نقطتين مهمتين. نظرية المقياس المشابهة للـديناميكا اللونيــة الكميـة تصف كيف يمكن للأوتار المرتبطة بأغشية D3 أن تتفاعل. ويمكن جعل تفاعلاتها أقوى أو أضعف بتغيير متغير بنظرية المقياس. وإذا جعلنا التفاعلات قوية جدًا فإن الحالات الحرارية تُوصف بأفضل الطرق بدلالة أفق الثقب الأسـود الـذى يحـيط بغشاء D3. وهذا الأفق صعب التخيل لأنه سطح ذو ثمانية أبعاد ضـمن هندسـة ذات عشرة أبعاد. وهناك تبسيط يمكن أن يساعدنى هو تخيل الأفق سطحًا مـستويًا ذا ثلاثة أبعاد وموازيًا للعالم الذى نعيش فيه. ولكنه مفصول عنه فى البعد الخـامس بمسافة مرتبطة بدرجة الحرارة. كلما كانت درجة الحرارة أكبـر كـان الانفـصال بينهما أصغر. وهذا التصور غير دقيق بسبب أن البعد الخـامس لا يـشبه أبعادنـا الأربعة المعتادة. فخبرتنا فى العالم رباعى الأبعاد تمثل ظلاً للحقيقـة فـى الأبعـاد الخمسة. لكن بخلاف الظل الذى تراه فى يوم مُشمس فإن معلومات الأبعاد الأربعـة لا تقل عن الحقيقة ذات الأبعاد الخمسة. وبالتالى فـإن الوصـف ربـاعى الأبعـاد وخماسى الأبعاد حقيقةً متكافئان وهذا التكافؤ بارع ولكنـه دقيـق. وهـذا القـول مجازى: فكل جملة تصنعها حول فيزياء الأبعاد الأربعة لهـا نظيـر فـى الأبعـاد الخمسة والعكس بالعكس على الأقل من ناحية المبدأ.

وهناك ثنائيات أُخرى مثل ثنائية نظرية الوتر ذات الأبعاد العشرة ونظريـة M ذات الأحد عشر بعدًا التى تُمثل تكافؤًا بين أغشية D0 والجسيمات المتحركـة

حول دائرة. والفتنة الخاصة لثنائية المقياس – الوتر تتمثل فى عدم ربط إحدى النظريات المجردة بأخرى فى أبعاد خارج قدرة الفرد على التخيل. بل فى التعامل مباشرةً مع فيزياء رباعية الأبعاد مشابهة لما نعلمه وتصف الكواركات والجلونات. وبالتالى فإن الأشياء المكافئة فى جانب الأبعاد الخمسة من الثنائية لها أهمية خاصة. والأكثر أهمية فى نقاشنا الحالى هو بلازما الكوارك – جلون والمُخلقة فى تصادمات الأيونات الثقيلة وترتبط بأفق ثقب أسود فى خمسة أبعاد. وما يجعل هذا التشابه يعمل هو أن تصادمات النوى الثقيلة تُنتج كمية من الحرارة كافية لإذابة النيوكلونات إلى مكوناتها الأساسية من الكواركات والجلونات. والنيوكلونات انفسها تُعتبر صعبةً نسبيًا فى تحولها إلى تركيبات فى خمسة أبعاد. بينما الكواركات والجلونات المختلفة تُعتبر صعبة أيضًا. ولكن السلوك الجماعى للحشد الحرارى التفاعل الشديد من الكواركات والجلونات من السهل أن يتحول: فيُصبح الحشد أفقًا.

هناك صفة مُحيرة لا تُذكر بالنسبة لثنائية المقياس – الوتر حيث إنه من الغريب أن يكون لدينا بعد خامس لكنه حقيقةً ليس كالأبعاد التى نعرفها ونحبها. وليس كمجرد اتجاه فيزيائى ولكنه كمفهوم يصف أوجه الفيزياء فى الأبعاد الأربعة. وفى النهاية لستُ مقتنعًا بأن الأبعاد الستة الإضافية لنظرية الوتر كنظرية لكل شىء لن تكون أكثر مادية من البعد الخامس فى ثنائية المقياس – الوتر.

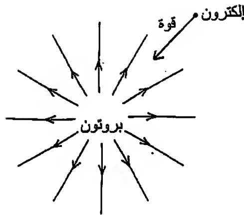
وتوجد سُخرية إضافية أن درجة حرارة الثقب الأسود يُفترض أنها هائلة جدًا عكس درجة الحرارة فى الثقوب المُفترض وجودها فى قلب المجرات. وكان تقديرنا فى الفصل الثالث لدرجة حرارة الثقب الأسود فى قلب المجرة نحو ١٠ -١٤ كلفن، بينما درجة حرارة الثقب الأسود فى خمسة أبعاد والمناظر لبلازما الكوارك– جلون أكثر من ثلاثة تريليونات كلفن. والذى يُسبب الفرق هو الشكل المنحنى لهندسة الأبعاد الخمسة.

وإذا قبلنا بصورة الحشد الحرارى للكواركات والجلونات كأفق فى الأبعاد الخمسة فما الذى سوف يحدث؟ حسنًا هناك أشياء كثيرة يمكن عملها لأن ثنائية المقياس – الوتر هى حسابية ذات قيمة عالية. وتعتبر اللزوجة واحدةً من الحسابات

المُفضلة: فعند حسابها عن طريق هندسة الثقب الأسود فإنها تبدو صغيرة جدًا بالمقارنة بكثافة البلازما ويبدو أن هذا يلائم بطريقة حسنة التفسير المقبول للبيانات. وبعض الحسابات الأخرى مُتعلقة بجسيمات ذات طاقة عالية لا تستطيع اختراق مسافة طويلة داخل البلازما. ولهذه الظاهرة صلة واضحة بفيزياء الثقب الأسود: فلا شيء يستطيع الخروج من الثقب الأسود. ولكن هذا لا يكافئ بالضبط قولنا إنه لا يوجد شيء يمكن أن يكون بعيدًا خلال وسط حرارى.

يُوجد حاليًا بعض الخلاف حول الإجابة الصحيحة لهذا السؤال فى وقت كتابة هذا الكتاب. وسأخبركم فقط بجانب من القصة وسألمح قليلاً حول هذا الخلاف.

وجانب القصة الذى سوف أشرحه يعتمد على فكرة وتر QCD وهذا مفهوم مهم ومُتفق عليه ولذا سأشرح من أين أتى. أولاً دعونى أذكركم بأن الإلكترونات تُنتج سحابة من الفوتونات التقديرية وهذه الفوتونات يمكن وصفها بدلالة المجال الكهربائى. وفى الحقيقة فإن أى شيء مشحون يُنتج مجالاً كهربائيًا. وكمثال فإن البروتون يفعل ذلك. والمجال الكهربائى المحيط بالبروتون يُعلم البروتونات الأخرى أى اتجاه تتحرك فيه كاستجابة للبروتون الأول. وتتنافر البروتونات مع بعضها كهربائيًا. والمجال الكهربى يُظهر هذا بكونه متجهًا للخارج. وتجذب البروتونات الإلكترونات وهذا يُوصف بنفس المجال الكهربائى: فبسبب أن الإلكترونات سالبة الشحنة فإنها تستجيب لهذا المجال الكهربائى عكس استجابة البروتونات.



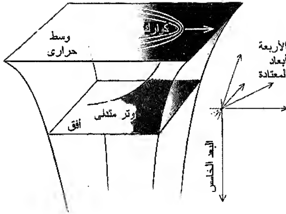


أعلى: يتجه المجال الكهربائى للبروتون إلى الخارج. أسفل: المجال الكهربائى – اللونى المتولد من الكوارك يكون وتر (QCD) الذى يمكن أن ينتهى على مضاد كوارك.

وتُشبه الكواركات الإلكترونات تقريبًا ولكنها تختلف عنها أيضًا بعمق. حيث إنها تُنتج سحابة من الجلونات التقديرية. ويمكن فهم هذا كمجال كهربائى لونى يُخبر الكواركات الأخرى فى أى اتجاه تتحرك. وحتى الآن تشابه الإلكترونات جدًا. ولكن الجلونات التقديرية تتفاعل بشدة مع بعضها البعض وَهو ما يخالف تمامًا الفوتونات. وبسبب هذه التفاعلات فإن المجال الكهربائى اللونى يتحول إلى وتر ضيق – وتر QCD – يمتد من كوارك إلى آخر. وتوجد جسيمات تُسمى

الميزونات التى يمكن فهمها بدلالة هذه التعبيرات: فإن اثنين من الكواركات يمكن أن يرتبطا بوتر QCD. وبدراسة خواص الميزونات يمكن أن نخمن بعض ديناميكيات وتر QCD وهو فى بعض الأحيان يشابه تمامًا الأوتار فى نظرية الوتر. وفى الحقيقة فإن هذه الدراسات أقدم من QCD أو نظرية الوتر. وقد أمدتنا هذه الدراسة بأول إيحاءات تأملية أن الأوتار يمكنها وصف أوجه الفيزياء دون النووية. والتجسيد الحديث لهذه التأملات هو أحد أوجه ثنائية المقياس – الوتر وعلاقتها بـ QCD. وفى الحقيقة فإن الشيء المختلف بين نظرية الوتر الحديثة وQCD أن الوتر يُعتبر جسيمًا أساسيًا فى نظرية الوتر بينما وتر QCD هو تأثير كلى لمجموعة الجلونات التقديرية. وبالتالى فإن درس ثنائيات الوتر هو ليس تمسكنا بشدة بتركيبة نظرية كشيء أساسى وتركيبة أخرى كشيء مُستنتج: فإذا اختلفت الظروف فكذلك ستختلف اللغات المناسبة لوصف الحقيقة.

والآن لنتخيل كوارك تم إنتاجه خلال عملية صلبة وقد أُرسل إلى بلازما الكوارك – جلون مثل الطلقة التى أُلقيت فى الماء. والفكرة خلف وتر QCD لا يزال لها بعض التداول: يحيط الكوارك نفسه بجلونات تقديرية وهذه الجلونات تتفاعل مع بعضها مما يؤدى إلى اتجاه لتكوين وتر QCD. ولكنَّ هناك شيئًا آخر يحدث: فكل الكواركات والجلونات فى هذا الحشد الحرارى تتفاعل مع الكوارك الأصلى ومع أى جلون تقديرى يمكن أن يُنتجه. ويمنع هذا الحشد الحرارى وتر QCD من التكون بالكامل. وإجمالاً فإن الصورة يمكن أن تظهر مثل: حيث يمثل الكوارك الأصلى الرأس ومحاولاته لتكوين وتر QCD تمثل ذيله. والطريقة التى يضرب بها ذيله فى الماء تماثل تفاعل الحشد الحرارى مع الجلونات التقديرية. وهذه الصورة ليست دقيقة تمامًا (حسبما أعلم) فى QCD ذاتها. ولكن هناك شيئًا مشابهًا لها فى ثنائية المقياس – الوتر. فإن الوتر يتدلى من الكوارك إلى أفق الثقب الأسود. وكلما تقدم الكوارك للأمام فإن الوتر سيجذب للأمام. ولكن نهايته المتدلية داخل الثقب الأسود تُعتبر مُلتصقة. ويُجذب الوتر إلى الكوارك حيث إنه لا يمكن



يؤدى الكوراك المتحرك داخل وسط حرارى مثل بلازمـــا الكـــوارك – جلون إلى تدلى الوتر إلى البعد الخامس حيث يعبر أفـــق ثقـــب أســـود. وعندما يتحرك الكوارك فإن الوتر يتدلى خلفه مما يؤدى إلى خلق قـــوة تؤثر على الكوارك.

أن يحرر طرفه الآخر من الثقب الأسود. وفى النهاية فإن الكوارك إما أن يستـــسلم ويتوقف عن الحركة أو يسقط هو الآخر داخل الثقب الأسود. وفى الحالتين فإنـــه لا يبعد كثيرًا.

ويُفترض فى الصورة التى وصفتها أن تلائم الكواركات الثقيلـــة. وكمثـــال للكواركات الثقيلة يوجد الكوارك الفاتن بكتلة نحـــو ٥٠% أكثـــر مـــن البروتـــون وكوارك القاع بكتلة أكثر من أربعة أضعاف كتلة البروتون وهذه الكواركات تقريبًـــا غائبة فى المواد العادية ولكنها تُنتج فى تصادمات الأيونات الثقيلـــة. والكواركـــات العادية فى المواد المعتادة بالإضافة إلى مضادات الكواركات بنفس الكتل تُنتج فـــى تصادمات الأيونات الثقيلة بوفرة أكثر كثيـــرًا مـــن الكواركـــات الثقيلـــة. وهنـــاك محاولات لتوسيع الصورة للكواركات التى تسحب وتـــرًا إلـــى حالـــة الكواركـــات المعتادة. ولكنها عمليات خواطر مؤقتة حتى الآن.

وتمدنا ثنائية المقياس – الوتر بالتنبؤ لأى مسافة يمكن للكوارك الثقيل أن ينتشر داخل وسط حرارى يشبه بلازما الكوارك – جلون. وبوجود مثل هذا التنبؤ فى متناولنا فإن الواجب المقبل هو اكتشاف مدى اتفاق هذا التنبؤ مع البيانات.

وهناك سببان لتفسير مدى البراعة المطلوبة عند تنفيذ هذا التنبؤ. الأول أن التجريبيين لا يستطيعون وضع ميكروسكوب فوق بلازما الكوارك – جلون وملاحظة أى كوارك ثقيل يتدحرج ثم يقف. وبالعكس فإن الكرة الصغيرة من البلازما المحتوية على الكوارك الثقيل تنفجر بالكامل فى زمن مقارب للزمن الذى يأخذه الضوء ليعبر نواة الذهب. وهذا زمن قصير جدًا جدًا: نحو ٤ × ١٠ ^-٢٣^ ثانية. والشىء الوحيد الذى يمكنهم عمله هو ملاحظة آلاف الجسيمات التى تُنتج. ويُعتبر شيئًا شائقًا جدًا كيف يستطيعون تخمين تفاعل الكوارك الفائق مع الوسط من فحص الركام. ويمكنهم أن يكونوا واثقين بنسبة ٩٩,٩٩% بقياساتهم ومع كل يكونون أقل تأكدًا من طول المسار المتوسط الذى عبره الكوارك الفائت داخل البلازما.

والسبب الثانى الذى يتطلب البراعة لمقارنة التنبؤ الخاص بثنائيات المقياس– الوتر مع البيانات أن حسابات نظرية الوتر تُطبق فى نظرية شبيهة بالـ QCD ولكنها ليست QCD نفسها. ولهذا فإنه يجب على النظريين أن يضعوا علاقة بين الطرفين قبل إبلاغ التجريبين بتوقعاتهم. وأفضل المحاولات لوضع تلك العلاقة تؤدى بأمانة إلى توقع المسافة التى يعبرها الكوارك الفائت قبل توقفه والتى تتفق مع البيانات أو ربما أصغر بمعامل ٢. ويمكن إجراء المقارنة نفسها بالنسبة للزوجة وفى النهاية فإن ثنائية المقياس – الوتر تؤدى إلى نتيجة إما تتفق مع البيانات أو أبعد عن تلك البيانات بمعامل ٢.

وإلى الآن فإن الاتفاق بين نظرية الوتر الحديثة والتجارب الحديثة بمعامل ٢ يُعد انتصارًا هائلاً لفيزياء الطاقة العالية. فمنذ خمسة عشر عامًا كان كل نظرىّ

الوتر كادحين خلال الأبعاد الإضافية بينما كان كـل تجريبـيِّ الأيونـات الثقيلـة مشغولين فى بناء كشافاتهم الضخمة. ولم يكن أحد منا قـادرًا علـى تخيـل نـوع الحسابات التى وصفتها. ولكننا الآن نقرأ أبحاث بعضنا البعض ونحضر المؤتمرات نفسها. ولا نزال قلقين بسبب معامل ٢ السابق لكن يُعتبر هذا إنجازًا.

قد أشرت سابقًا إلى أن هناك خلافًا لتحويل توقف كوارك عالى الطاقة إلـى عملية تتضمن الأوتار والثقوب السوداء. وهذا الخلاف ليس بسبب اختلاف البيانات بمعامل ٢ لكن على العكس فهو اختلاف حول الصورة الفيزيائية التى ينبغى للفـرد أن تكون لديه لوصف كوارك عالى الطاقة. والصورة التى شرحتها تتضمن وتـرًا متدليًا من كوارك إلى البعد الخامس وأفق الثقب الأسود. والصورة المنافـسة أكثـر تجريدًا ولكنها تعتمد أساسًا على تمثيل الوتر على شكل حرف u حيث يمـس قـاع حرف u الأفق. وسوف أشير إلى الصورتين بالوتر المتدلى والـوتر علـى شـكل حرف u. وميزة الصورة الأخيرة أنها تساعد على وصف الكواركـات المعتـادة. وهذا جيد لأنها أكثر وفرة وبالتالى أسهل فى دراستها. يؤدى الوتر ذو الشكل u إلى توقعات حول فقد طاقة الكوارك التى هى متفقة مع البيانات أو مختلفة بمعامـل ٢. ونصير كل صورة من هاتين الصورتين قد أبدى انتقادات محـددة للآخـر. وهـى ليست مناظرة سهلة لتسويتها فإن الأسئلة مجردة والفروض مختلفة قليلاً والاتفـاق مع البيانات يُتوقع أن يكون تقريبيًا. ومع هذا فإننى أعتبر كل هـذا علامـة نجـاح حيث يتجادل فيزيائيو الوتر حول الطرق المختلفة للحسابات التى تمكـن مقارنتهـا بالبيانات على الأقل تقريبًا.

وما المستقبل؟ بالنسبة لتصادمات الأيونات الثقيلة فإنى أعتقد أنه كلما كانت هناك تصادمات أكثر كان هذا أفضل. وكلما زادت الحسابات التى يستطيع فيزيائيو الوتر أداءها زاد فهمهم للمسائل الصعبة فى التحويلات. والهدف هو الحصول على طريقة تحويلات مرتبطة ومتسقة بين التركيبات ذات الأبعـاد الخمـسة والكميـات

المقاسة تجريبيًا. ويبدو أن هذا البرنامج يصطدم بعقبة فى الطريق عند نقطـة مـا: ربما يوجد بعض الاختلافات التى لا يمكن قهرها بـين تركيبـات نظريـة الـوتر ونظرية QCD للعالم الحقيقى. وحتى الآن لم يحدث هذا لكن من الممكن أن يحـدث أيضًا أن حسابات نظرية الوتر تتلاشى بسبب عدم المقدرة على مواجهة الصعوبات الفنية. ويبدو أن نظرية الوتر تمر بنوبات فتحقق كثيرًا من التقدم ثم ركودًا نسبيًّا ثم تقدمًا أكثر وهكذا.

وسوف تشمل تجارب LHC سحق أنوية الرصاص بطاقات أعلى من التى يصل إليها RHIC. (تذكر أنه لغرض تصادمات الأيونات الثقيلة فـإن الرصـاص والذهب تقريبًا متطابقان). والبيانات الناتجة من هذه التصادمات سوف تمدنا بحـافز قوى جديد بالنسبة للاتجاهات النظرية سواء مرتبطة أو غير مرتبطة بنظرية الوتر. وضمن الميزات المتعددة التى يمكن توقعها فإن تصادمات الأيونات الثقيلـة داخـل LHC سوف تُنتج كواركات ثقيلة بوفرة أكثر من التى تنتج من RHIC. بالإضـافة إلى أن الكشافات داخل LHC أكثر تقدمًا من تلك الموجودة بـRHIC. ولهذا فإنـه من المعقول أن نأمل فى الحصول على وضوح أكثر للصورة الفيزيائيـة المتعلقـة بفقد الطاقة من الكواركات المتحركة سريعًا المنتجة من LHC.

ومن العدل أن نقول إن التشويق الأساسى المرتبط بـ LHC هو: مـا الجـسيمات الجديدة التى سيكتشفها؟ ما التماثلات الجديدة؟ وتصادمات البروتون – بروتون هى الأفضل، حتى الآن، لمثل تلك الاكتشافات من تصادمات الأيونات الثقيلة. بسبب أن الطاقة لكل بروتون تكون أعلى وأيضًا بسبب كون البيئة أقل ضوضـاء. وبطبيعـة الحال فإن التكهن باكتشافات LHC هو أكثر من هوايـة لـدى النظـريين. وأثنـاء قراءتك لهذا الكتاب فمن المحتمل أنك ستعرف أشياء أكثر مما أعرفـه الآن. لكـن سوف أجازف بهذا التخمين: إذا لم نكن محظوظين فإن الاكتشافات لن تومض مثل برق الصواعق عبر السماء. فإن التجارب صعبة والنظريـات مجـردة والتوفيـق

بينهما سوف يتضمن صعابًا ومُناظرات ربما أكثر حدة من التى شرحتها فـــى هــذا الفصل. حتى إذا ظهرت بعض الاكتشافات فإن وضع كل شىء فى مكانه للحصول على صورة مترابطة يبدو أنه سيكون عملية طويلة ومركبة. وبسبب إنجازاتها حتى الآن، وبسبب ثراء تركيبها الرياضى، وبسبب طريقتها فى تزاوج الأفكار النظريــة بالأخرى بدءًا من ميكانيكا الكم إلى نظرية المقياس إلى الجاذبيــة فــإنى أتوقــع أن نظرية الوتر ستكون جزءًا حاسمًا من الإجابة النهائية.

الخاتمة

توجد أوجه كثيرة لنظرية الوتر يمكن التأمـل فيهـا بعـد الجولـة داخـل الموضوع والتى أكملناها للتو. يمكن أن نفكر فى القيود الخاصة التى تضعها علـى الزمكان مثل الأبعاد العشرة والتماثل الفائق. ويمكننا تأمل الأشياء الخاصـة التـى تتطلب وجودها بدءًا من أغشية D0 وانتهاءً بأغشية نهاية العالم. ويمكننا التأمل فى صلتها الضعيفة ولكنها تتحسن بالفيزياء العملية. ويمكننا أيضًا أن نقيم الجدل الـذى تُولده هذه النظرية: هل تستحق نظرية الوتر كل هذا؟ هل هى معيبة بإفراط؟

وبالرغم من أن كل هذه المواضيع ساحرة فإن الموضوع الذى أعتقـد أنـه يستحق الانتهاء منه هو الرياضيات التى تصنع قلب نظرية الوتر. حسنًا، إن أفضل شيء فى نظرية الوتر هى المعادلات. فمعظم معادلات نظرية الوتر تتضمن حساب التفاضل والتكامل والتى تجعلها فى غير متناول القُراء غير المتخصصين. ولذا فقد حاولت أن آخذ حفنة من المعادلات المهمة مما يتماشى مع الموضوعات التى تمـت تغطيتها من الفصل الخامس إلى الثامن وقمت بوضعها فى كلمات.

وأهم معادلة أساسية فى نظرية الوتر هى المعادلـة التـى تُحـدد حركـة الأوتار. وما تقوله هذه المعادلة هو أن الأوتار تحاول التحـرك خـلال الزمكـان بالطريقة التى تجعل مساحة السطح الممسوح بهذه الأوتار أصغر ما يمكن. وهـذه الحركة لا تأخذ ميكانيكا الكم فى الاعتبار. وهناك معادلة أُخرى (حقيقـة مجموعـة من المعادلات) تشرح كيف يمكن دمج ميكانيكا الكم فى حركة الأوتـار. وتخبرنـا هذه المعادلات أن أى حركة للوتر ممكنة. ولكن الحركـات المختلفـة قلـيلاً عـن الحركة ذات المساحة الصغرى، تقوى بعضها البعض. وما أعنيه بالتقوية يوضـح

كالآتى: تخيل باقة من العصى مصطفة معًا وهذه الباقة قوية جدًا وأكثر قوة من كل عصا على حدة. وكل حركة ممكنة للوتر تشبه العصا المنفردة. ومعظمها موزع بطريقةٍ غير منظمة. ولكن حركات الوتر القريبة من الحركات ذات المساحة الصغرى تكون مصطفة بطريقة تجعلها تحكم المعادلات التى تصف ميكانيكا الكم للأوتار.

والمعادلات التى تصف أغشية *D* تكون مختلفة عن تلك التى تصف الأوتار. وأقوى صفة مميزة تظهر عندما يكون كثير من الأغشية مُجمعةً معًا فإنه يكون لها طرق للحركة أكثر من أبعاد الزمكان. وعندما تتباعد أغشية *D* فإن الزمكان ذا الأبعاد العشرة يصف مواضعها النسبية. لكن عندما تقترب أغشية *D* بما فيه الكفاية فإنها تستخدم نظرية المقياس لوصف حركتها. ومعادلات نظرية المقياس تخبرنا أن الأوتار المشدودة بين زوج من الأغشية لا يمكن أن يُطلق عليها أنها تذهب من غشاء أحمر إلى غشاء أزرق أو من أخضر إلى أحمر. وبالعكس فإن كل هذه الإمكانيات يمكن أن تتجمع فى دالة موجية وحيدة ملونة مثل الطريقة التى تتجمع بها الألحان والإيقاعات دون فقدان شخصيتها المنفصلة.

ومعادلات ثنائيات الوتر لها منزلة رفيعة. والتى تدخل على مستوى الجاذبية الفائقة هى معادلات بسيطة عادةً ما تعبر عن بعض علاقات التماثل. والمعادلات التى تصف الأوتار والأغشية هى معادلات كمية ولكنها لا تزال بسيطة: ومعظم هذه المعادلات تخبرنا أن الشحنة الكهربائية (أو شبيه الشحنة الكهربية) للأغشية يجب أن تأخذ قيمة عددية صحيحة بوحدات مناسبة. ويوجد كثير وكثير من المعادلات الأخرى فى ثنائيات الوتر معظمها ناشئ عن محاولة اقتفاء الأثر بدقة لوصف العلاقات الحدسية التى ناقشناها بصورة كمية. وكمثال هو حساب كيف تُسهم التموجات الكمية لمجموعة من أغشية D0 فى كتلة المجموعة ؟ والإجابة (أنها لا تُسهم على الإطلاق) كانت متوقعةً معتمدةً على الثنائية مع نظرية M من فترة طويلة قبل محاولة إثباتها عن طريق المعادلات.

وتبدأ معادلات التماثل الفائق بعلاقات مثل $a \times a = 0$ ولهذه المعادلة عدة معانٍ، فهى تعنى أنه توجد فقط حالتان من الحركة فـــى البعـــد الفيرميـــونى: متحركًا أو واقفًا. وتعنى أيضًا أن اثنين من الفيرميونات لا يستطيعان الوجـــود فـــى الحالة نفسها (مبدأ الاستبعاد) كما ناقشنا بالنسبة للإلكترونات فى ذرة الهيليوم. ويبدأ التماثل الفائق من العلاقات البسيطة مثل $a \times a = 0$ إلى معادلات عميقة حقًـــا ساعدت على تشكيل الرياضيات الحديثة.

والمعادلات التى تصف الثقوب السوداء وثنائية المقياس/ الوتر تأتى غالبًـــا فى شكلين. النوع الأول من المعادلات هو معادلات تفاضـــلية. وهـــذه المعـــادلات تصف دقيقة بدقيقة السلوك التفصيلى لوتر أو جُسيم فى الزمكان أو الزمكان ذاتـــه. بينما النوع الآخر من المعادلات له نكهة عالمية أكثر. فإنـــك تـــصف مـــا يحـــدث داخل الزمكان كله مرة واحدة. ونوعا المعادلات مرتبطان بـــشدة غالبًـــا. وكمثـــال توجد معادلة تفاضلية تعنى أساسًا أن هناك جسيمًا يقول أنا أسقط. وتوجـــد معادلـــة أُخرى عالمية تصف أفق الثقب الأسود تقول أساسًا اعبر هذا الخط فلـــن تـــستطيع العودة ثانية.

وبالرغم من أهمية الرياضيات لنظرية الوتر فإنه سوف يكون مـــن الخطـــأ اعتبار نظرية الوتر كمجرد تجميعة كبيرة من المعادلات. فإن المعادلات تمثل فُرش الدهان فدون تلك الفُرش لن يكون هناك دهان ولكن الدهان هو أكثر من مجرد تجميع كبير لفُرش الدهان. ودون شك فإن نظرية الوتر تمثل لوحة غير منتهية. والـــسؤال الكبير هو متى تمتلئ تلك الفراغات؛ وهل الصورة الناتجة ستُظهر العالم؟

المؤلف فى سطور:

ستيفن جابسر

أستاذ الفيزياء فى جامعة برنستون، وترتكز أبحاثه على فيزياء الجسيمات خاصة نظرية الوتر، بعد حصوله على الدكتوراه فى برنستون عمل فى أبحاثه ما بعد الدكتوراه فى جامعة هارفارد ثم تحرك إلى معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ثم عاد إلى برنستون عام ٢٠٠٢ بوصفه أول أمريكيا يحصل على جائزة الأوليمبياد الدولى للفيزياء في عام ١٩٨٩، وقد قام بعمل أكثر من ٢٥ بحثًا يدور حول نظرية الوتر وتطبيقاتها.

المترجم فى سطور:

إيمان طه أبو الدهب

حاصل على دكتوراه فى الرياضيات التطبيقية فى جامعة كنت - المملكة المتحدة، ويعمل حاليًا رئيس قسم العلوم الأساسية فى كلية الحاسبات - الجامعة الحديثة.

التصحيح اللغوى: سـارة محمـد
الإشراف الفنـى: حسن كامـل